日本製鋼所技報

産業機械特集号

2015 66

日本製鋼所

日本製鋼所技報
第六十六号（産業機械特集号）
平成二十七年 十月

日本製鋼所技報　No,66（産業機械特集号）　目次

巻頭言

JSW

「産業機械特集号に寄せて」

取締役専務執行役員
産業機械事業部長
清水　信明

日本製鋼所技報「産業機械特集号」の発刊に当たり、一言ご挨拶を申し上げます。

当社の歴史は兵器の国産化を謳い、1907年に室蘭の地で操業を開始したところから始まりました。創業期は素形材事業をコアとした兵器の製造と共に発展しました。その後、終戦により民需への転換を余儀なくされ、ここから当社の産業機械の新たな歴史が始まりました。1949年には圧縮機、その後1950年代から1960年代にかけて二軸混練機、射出成形機、中空成形機、デッキクレーン、ボルトテンショナー、1970年にはフィルム二軸延伸装置の技術と次々に新しい製品の技術を導入していきました。当時の日本企業は皆がそうであったように積極的に西洋の技術を導入しました。1950年には現在の樹脂機械のスタートと言えるスクリュ径65mmの押出機を電線被覆装置用として納入しました。また、この年に当時の国鉄に自動連結器を納入しました。製紙機械分野に進出したのもこの頃です。1952年には4,160mm幅の抄紙機を納入したとの記録があります。1960年代には発馬機やボーリングのピンセッターも手掛けています。一部撤退した製品もありますが、これらの製品は日本の高度経済成長の波に乗って大きく進化し、大部分が現在も当社の主力製品として産業機械事業を支えています。

比較的新しい製品としては、1990年代の後半にレーザーアニール事業が横浜製作所で始まりました。この事業は形を変え、スマートフォン、タブレット、PCのディスプレイ用の結晶化装置やレーザー加工装置、プラズマ技術を用いた成膜装置などのIT関連装置事業として発展していきました。

これが当社の産業機械製品の変遷ですが、大部分は先輩諸氏が西洋から導入した技術を習得し、改善、改良することで発展してきました。この間、より多く、より大きく、より速く、或いはより薄く、市場の要求は変化していき、当社の製品もそれに対応して進化発展してきた歴史と言えます。先輩諸氏が残してくれた製品をしっかり守ってきたとも言えますが、それ以外の何か新しいものへの挑戦が結果として不足（製品として生き残っていない）していたとも言えます。Zero to Oneの本の中でピーター・ティールが「既に在るものをコピーや少し変えることは比較的に簡単。しかし1がnに増えるだけ。新しい何かを生み出せばゼロが1になる」と言っています。既存製品、既存技術を伸ばしていくこと事は当然の活動ですが、モノづくりの会社のプライドとして何か新しいモノを創造していきたいものであります。

フィルムの変遷を見ると1970年代はオーディオテープが全盛期でした。カセットテープの60分ものが120分ものになり（そのためにはテープの厚みは薄くしなければならなかった）、次に出てきたのはビデオテープ、しかし、その次にCD，DVDが出てくると残念ながらテープの主役としての役目は終わりを告げました。厚いフィルムでも同じような変遷がありました。写真用のフィルム、OHPフィルムやレントゲンのフィルムなども現在ではその役目はデジタルカメラ、スマートフォンやタブレットまたはPCに置き換わってしまいました。ある日突然主役が変わる、そんな事が起きるスピードもどんどん速くなってきています。木を見るのではなく森を見るように、技術面だけでなく多様な側面から俯瞰して見る目、先を読む力を持つことが今後さらに重要となってきます。

巷に飛び交うワードにトータルソリューション、大量生産から小ロット生産へ、IoT（もののインターネット）、インダストリー4.0、人工知能（AI）、ビッグデータなどデジタル技術の活用が叫ばれています。単なるハードの世界ではなく、ハードとソフトの融合に向けた対応が必要であります。

当社は2015年度をスタート年とする3カ年の新中期経営計画JGP2017（JSW Group Growth Plan）を策定しました。この新中計において目指す企業像として「グローバル＆ニッチトップ企業グループへの飛躍」を謳い、顧客のバリューチェーンの要衝においてトップシェアを目指すとしております。今回発刊する技報は、産業機械製品の特集号です。今後とも当社の屋台骨を支えていく主力製品の技術を紹介していますので、当社の産業機械製品をご理解いただきますようお願い申し上げますとともに今後とも、当社へのご支援、ご鞭撻を宜しくお願い致します。

樹脂機械の技術の変遷と将来展望

History and Future Prospects of Plastics Machinery

山澤　隆行 *
Takayuki Yamazawa

木村　嘉隆 *
Yoshitaka Kimura

柿崎　淳 *
Jun Kakizaki

兼山　政輝 **
Masaki Kaneyama

福島　武 ***
Takeshi Fukushima

藤原　幸雄 ****
Yukio Fujiwara

鎰谷　敏夫 ****
Toshio Kagitani

井上　茂樹 *****
Shigeki Inoue

要　　旨

当社の樹脂機械の歴史は 1951（昭和 26）年の単軸押出機の国産化から始まった。1959（昭和 34）年にフィルム・シート成形機の分野、次いで 1962（昭和 37）年に中空成形機の分野へと拡大、1970（昭和 45）年には単軸押出機は大型二軸造粒機へと進化し、更に 1979（昭和 54）年のコンパウンド製造用二軸スクリュ押出機 TEX の開発につながって行く。ここでは、各樹脂機械製品の誕生から今日まで辿って来た技術の変遷と将来の展望について解説する。

―― Synopsis ――

The history of plastic machinery in JSW goes back to 1951, when we started domestic production of single-screw extruders. We expanded into the market of film & sheet processing equipment in 1959 and blow molding equipment in 1962. The single-screw extruder was developed into the large sized twin-screw mixer in 1970, leading to the development of twin screw extruder TEX for plastic compounding in 1979. We describe here the history of our technology from the beginning of each product and future prospects as well.

1. 緒　　言

戦後の石油化学の幕開けとともに、弊社は押出機メーカーとしての第一歩を踏み出した。それから 60 年以上に亘って、石油化学事業の好況、不況の波を再三に受けながらも世界 NO.1 の総合樹脂成形加工機械メーカーをめざし、樹脂原料製造用造粒機、コンパウンド製造用押出機、フィルム・シート成形機、中空成形機の分野において着実に発展し、市場における地位を築いてきた。ここではその 60 数年の樹脂機械の技術の変遷と将来展望について解説する。

* : 広島製作所　樹脂製造機械部
Plastics Machinery Dept., Hiroshima Plant

** : 広島製作所　電装技術部
Electrical Engineering Dept., Hiroshima Plant

*** 広島製作所　樹脂加工機械部
Plastics Processing Machinery Dept., Hiroshima Plant

**** : 横浜製作所　産機部
Industrial Machinery Dept., Yokohama Plant

***** : 広島研究所 / 広島製作所
Hiroshima Research Laboratory / Hiroshima Plant

2. 各樹脂機械製品の技術の変遷と将来展望

2.1 造粒機

2.1.1 単軸押出機

1950（昭和25）年代の始め、石油化学産業は、欧米のプロセスオーナーからの技術導入により変革の時を迎えた。当社は、その業界の流れを察知し、樹脂機械ビジネスをスタートさせた。度重なる試行錯誤の末、第一号機となるスクリュ径65mmの軟質PVC用単軸押出機を開発した（写真１）。

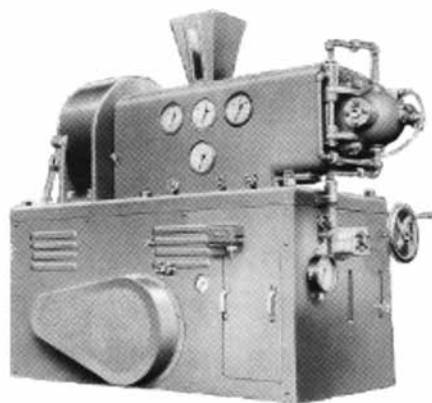



写真1　JSW製第一号押出機（1950年）
2·1/2インチ油熱式軟質PVC用

1958（昭和33）年頃になると、石油化学系企業のナフサセンターが相次いで稼動を始め、エチレンの生産が開始された[(1)]。その強力なエチレン供給体制を背景にして、日本の石油化学工業はポリエチレンなどのエチレン系誘導品を中心として飛躍を遂げ、それとともに当社は押出機開発を本格的に始めた[(2)]。1960（昭和35）年代では、成形品・フィルム・電線等の用途として、ポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)等が脚光を浴びた。当時は単軸押出機が主流であったことから、1960（昭和35）年に低密度ポリエチレン（LDPE）用単軸押出機P200（スクリュ径200mm）（写真２）、1962（昭和37）年に高密度ポリエチレン（HDPE）用とPP用単軸押出機P200等を製造した。

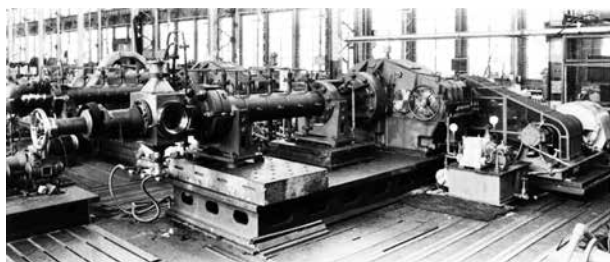



写真２　初期の単軸押出機P200（1960年）

当時、LDPEには、①メルトフィードタイプ、②ホモジナイジングタイプ、③メルトホモタイプの３種類があった。メルトフィードタイプについては、重合器の種類にオートクレーブ型とチューブ型の２種類があり、チューブ型は高能力化の市場要求と一致したため、現在も市場の主流技術として採用されている。メルトフィードタイプではポリマーの可塑化を必要としないため単軸押出機が適しており、高能力化への対応のため、P305（1961／昭和36年）、P380（1969／昭和44年）、P460（1974／昭和49年）へと次々に大型化が推進された。現在では、さらなるプラントの大型化に対応して高能力化し、一台当たり50トン毎時を達成したスクリュ径600mmのP600（2000／平成12年）や、70トン毎時用P700（2007／平成19年）の大型単軸押出機へと進化している（写真3）。一方、ホモジナイジングタイプおよびメルトホモタイプの単軸押出機は、上流の重合技術などの理由により市場から次第に姿を消すこととなった。

HDPEおよびPP用造粒機に関しては、ポリマーの可塑化が必要なため、単軸押出機では高能力化への対応に限界があり、1980（昭和55）年代後半のP305製造を最後に二軸押出機へと移行していくこととなる。

写真３　大型単軸押出機 P700（2007年）

2.1.2 二軸異方向回転ミキサー＋単軸押出機

1970（昭和45）年代前半、市場要求であった10トン毎時以上の高能力を達成すべく、単軸押出機に代わって開発されたのが二軸異方向回転ミキサーCIM（Continuous Intensive Mixer）（写真4）と単軸押出機のタンデム装置であった。[(3)] これは、可塑化能力を飛躍的に向上させた二軸異方向回転ミキサーCIMに独自の混練調整機能“スロット”を搭載し、昇圧装置として単軸押出機を組み合わせたシステムである。このシステムにより、PPおよびHDPEの処理量を４トン毎時から10トン毎時へと大きく飛躍させることが可能となった。

CIMと単軸押出機のタンデム装置は、1970（昭和45）年代から1980（昭和55）年代前半にかけて、海外の有力な顧客に積極的に採用され、約110台が納入された。1974（昭和49）年には、当時最大級であったCIM400の

開発により、処理能力を大幅に改善することが出来た。しかし、このタンデム式では一階と二階にそれぞれ一台の押出機が設置されるため、建屋に広いスペースを必要とし、プラント設備費の増大など、新たな課題をもたらした。さらに、1980（昭和55）年代に入ると、気相法による大型プラントが出現し、一台当たり30トン毎時のペレットを製造するための新たな押出機開発への要求が高まった。

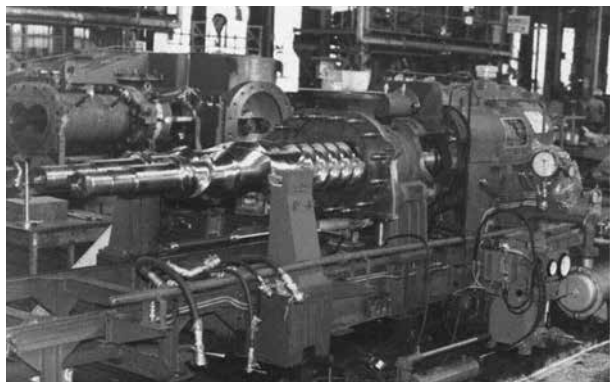



写真4　タンデム式二軸ミキサー CIM320（1970年）

2.1.3　ギアポンプによる高効率化、省エネルギー化

ギアポンプは、従来の単軸スクリュによる押出法と比較して約1/3のエネルギー消費量での押出しが可能であり、20MPaという過大な樹脂圧力に対しても比較的安定した連続運転が可能である。当社は、CIMから得た二軸異方向回転ミキサーの技術に自社製ギアポンプを組み合わせて、新機種のCMP（Continuous Mixer Pump System）を開発した。ギアポンプを採用することで、高能力化に伴いスクリーンやダイスで発生する極度の高樹脂圧力問題も解決することができている。当時最大級の能力であったCMP400（写真5）は、北米の工場等へ納入され32トン毎時（その後、改造により60トン毎時を達成）という高能力を達成したが、この異方向回転型CMPシリーズの製造総実績は約20台であった。

写真5　二軸異方向ギアポンプ付押出機 CMP400（1986年）

1980（昭和55）年代の中頃、CMPの技術的課題の解決の為、二軸異方向回転ミキサーに代わり、安定性に優れる同方向回転を採用した新型CMP-Xシリーズを開発した。1987（昭和62）年、ポリプロピレン製造において主流であった大手石油化学企業へ20トン毎時用造粒機としてCMP305Xを納入した。CMP-Xは、その優れたコストパフォーマンスにより、約120台が世界の石油化学業界のメジャー各社に幅広く採用された。

また、自社製大型ギアポンプGP450Tを1986（昭和61）年に開発し（写真6）、高能力に対応した大型造粒機メーカーとしての地位を確立した。2010年／平成22年に100トン毎時に対応するGP630T-Mを上市し、製造、納入実績としてはPPを70トン毎時で生産できるGP560T-M（2013年／平成25年）がある（写真7）。

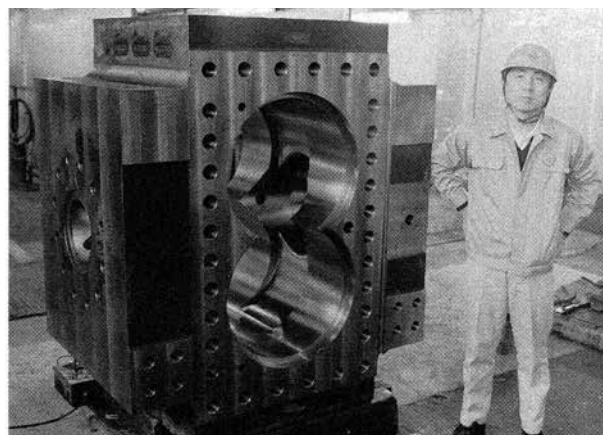



写真6　大型一号機ギアポンプ GP450T のケーシング（1986年）

写真7　ギアポンプ GP560T-M（2013年）

1990（平成2）年代は、海外の石油化学業界の再編が著しく進み、プラントは超大型化の時代となった。巨大企業となった世界の石化メジャー各社は、中東や中国に大規

模な設備投資を進めた。その結果、ペレットの処理量は、30トン毎時のレベルから60トン毎時へと更なる高能力化へ拍車が掛かった。この高能力化を実現する為に、スクリュのL/Dを従来の2倍以上へと延長し樹脂の輸送能力と可塑化能力を向上させた新型CMP(-XII)シリーズを開発した。さらには、省エネルギー化とシステム安定性のため、スクリュ設計を改善したギアポンプレスCMP(-XII)の開発にも成功した(写真8)。(注：現在は呼称統合の為、末尾のXIIは省略されている) CMP335(XII)(2000／平成12年)、CMP362(XII)(2006／平成18年)、CMP387(XII)(2007／平成19年)と大型化を達成したことにより、PPにて70トン毎時という高能力に対応できるようになり、造粒機の世界トップメーカーとしての実力をつけてきた。

写真8　ギアポンプレス造粒機 CMP362XII (2006年)

一方、ポリエチレン用としては、高粘度グレードへの対応、バイモダールグレードへの対応から、1990(平成2)年代の後半にCIM(-P)シリーズを上市した。このCIM(-P)の特徴は、スクリュの両端を支持する構造の非噛合型異方向回転の高性能ローターとギアポンプを搭載して高混練と高能力を達成したことである。CIM(-P)は、パイプやフィルム用途のHDPEの造粒用にCIM280(P)(1997／平成9年)、CIM460(P)(1999／平成11年)、CIM510(P)(2015／平成27年製造中)と数々の実績を誇る(写真9)。(注：現在は呼称統合の為、末尾のPは省略されている)

写真9　ポリエチレン用大型造粒機 CIM460 (1999年)

2.1.4　造粒機の今後の展望

上記にて説明したこれまでの造粒機の変遷をあらためて図1に示す。当社造粒機の歴史は1960(昭和35)年代の単軸の時代、1970(昭和45)年代のCIM＋単軸押出機の時代、1980(昭和55)年代のギアポンプ採用の時代を経て、市場ニーズにより既存技術を使い分け、顧客プロセスに最適なシステムを供給する“機種選択の時代”へと移行してきた。

造粒機の今後の展望について、以下の二つのポイントについて述べる。

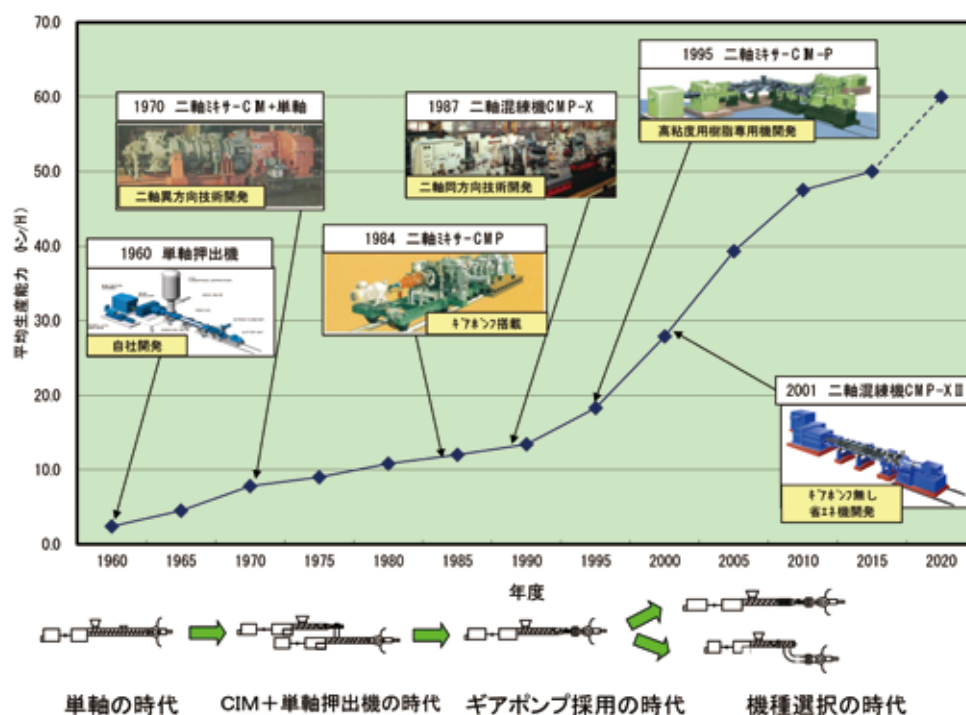



図1　造粒機の変遷

1）高能力化

2010 年頃からのシェールガス生産の本格化に伴い、豊富な原料供給を背景に石油化学系企業各社が数々の増設計画を推し進めている。シェールガス由来のプラントの特徴としてエチレンの製造割合が高く、超大型ポリエチレンプラントの建設が多数計画されており、要求される処理量は一系列当たり 100 トン毎時に達する場合もある。（図2）

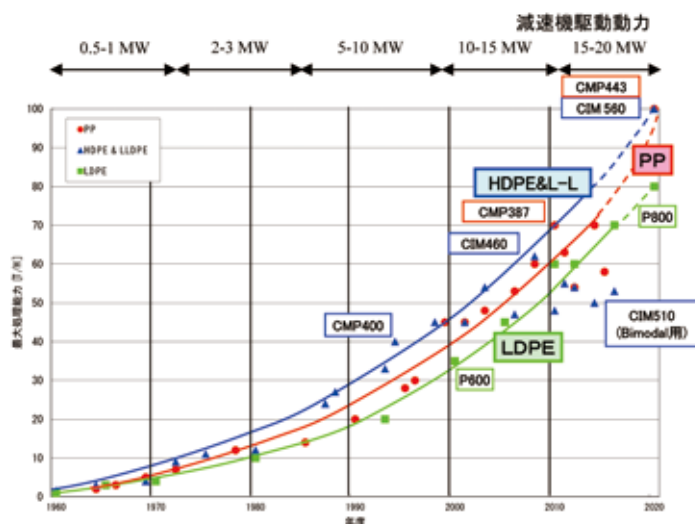



図2　今後の造粒機の高能力化

この高能力化を確実に達成するためには、樹脂に適した機種の選択、サイズアップによる大型化が必要である。ポリオレフィン業界は、大きく PP、HDPE と直鎖状低密度ポリエチレン（L-LDPE）、LDPE の 4 つに分けられる。比較的粘度が低く、添加剤と相性の良い PP には、低剪断混練で滞留時間の長いタイプの二軸同方向回転押出機 CMP（-XⅡ）が適している。粘度が比較的高く、機械的に高い耐久性が要求される HDPE と L-LDPE には、高剪断混練で滞留時間が短く、スクリュ両持ちタイプの異方向回転二軸押出機 CIM（-P）が適している。また、可塑化を伴わないメルトフィードで安価な押出機が要求される LDPE には、単軸押出機 P シリーズが適している（図3）。

今後は、既にラインナップに備えている以下の機種にて顧客要求への対応を図る。PP：CMP443（XⅡ）（2008／平成 20 年上市）、HDPE & L-LDPE：CIM560（2010／平成 22 年上市）、LDPE：P800（2008／平成 20 年上市）。また、減速機、ギアポンプ、オートスクリーンチェンジャー、カッター装置などの付属機器についても、更なる大型化を推進している。

同時に、同一サイズにてより高能力を達成する為の技術開発も推進中であり、ラボスケールでの検証を完了したプロセスについては、既設プラント改造や新規案件への対応を検討中である。

2）更なる省エネルギー化・省人化

近年、ライフサイクルコストの低減や省エネルギー化・自動化が顧客の評価項目の中で重要となってきている。ギアポンプレス押出機による電力消費量の低減、スクリュや減速機などメインパーツの機械的信頼性の向上、カッター刃やダイスなどの消耗品の長寿命化などの技術に着目し開発を重ねてきた。さらに、オペレーターの安全

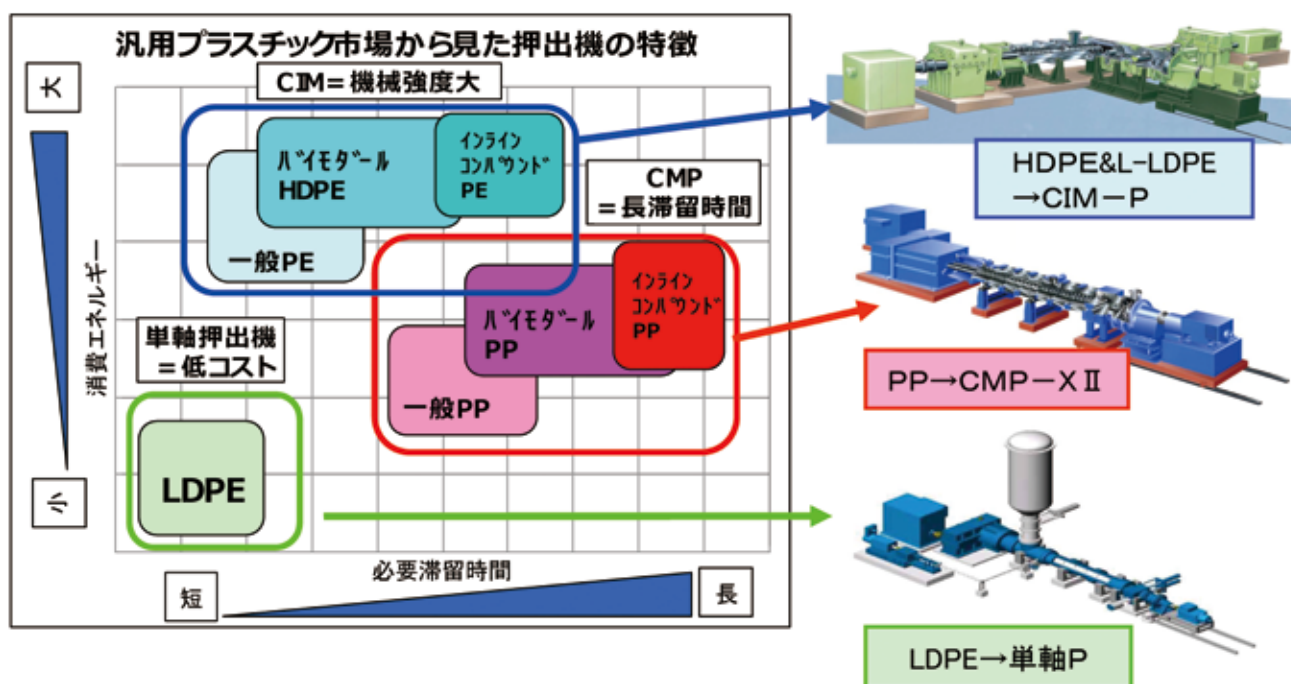



図3　機種選択の時代

性向上の観点から樹脂パージ作業を削減する自動水中スタートシステムを開発(4)、現在はこれら技術を標準的に採用し、差別化を推進している。特に、最近のプロジェクトでは、生産コストの削減を図るため、建設されるプラントの地域性からオペレーターも未熟練者であるケースが多く、運転の自動化は安全性確保の目的からも大変重要であり、顧客から好評を得ている。

2.2 コンパウンド用押出機(二軸スクリュ押出機TEXシリーズ)

2.2.1 二軸異方向回転押出機

当社のコンパウンド用の二軸スクリュ押出機の歴史は、Welding社の非噛合型二軸異方向回転押出機とKraussmaffei社の噛合型二軸同方向回転押出機DSMの技術導入に始まる。当時、DSMは主にPVCやABSの押出用途に多く使用され、1965(昭和40)年から1980(昭和55)年の15年間で約80台を販売した。二軸押出機TEXシリーズの開発は、1978(昭和53)年に始まった。第1号機となるプロト機は噛合型二軸異方向回転方式で、スクリュ外径は65mmであり、弊社広島製作所の研究部門に設置し基礎実験データの取得や顧客の要求仕様に対する検証実験に活用された。写真10に生産機として納入した初期型のTEX65の外観を示す。

写真10 初期型TEX65の外観(異方向回転式)

TEXシリーズは1段(単独)方式であるため、CIMミキサーと単軸押出機との2段(タンデム)方式に対し、システムのシンプル化、省スペース化、省エネルギー化などを特徴とし、さらに脱揮・脱水などの機能を付加することが可能で、プロセスの合理化に寄与できるなど多くのメリットを発揮した。具体的には、シリンダのL/D(シリンダ径Dに対するシリンダ長Lの無次元長さ)は、当時のCIMミキサーが約5～7であったのに対し、TEXシリーズは30以上で、かつベント数も2箇所以上を任意に設定することが出来た。これらの特長を生かし、1984(昭和59)年に溶液法L-LDPEの脱揮プロセス向けにTEX305S-32(O)-3Vを納入し、約10トン毎時の生産量を達成した(写真11)。

写真11 TEX305S-32(O)-3V(同型機)の外観

2.2.2 異方向回転式から同方向回転式への転換

1985(昭和60)年ごろになると、コンパウンド市場では高能力化や複成分原料の均一混合分散への要求が高まった。TEXシリーズは、高せん断を特徴とする異方向回転と、オペレーションの安定性やスクリュのセルフクリーニング性に優れた同方向回転との両方を可能にした切り替え方式を採用し、用途に応じて回転方向を選択できる仕様とした。これより、樹脂材料の特性を最大限に生かし、より高品質な製品を得ることが可能となった。また、スクリュとシリンダは、それぞれセグメント化およびブロック化して、プロセスに対してフレキシブルな対応が図れるよう設計された。また、摩耗や腐食が発生しても、その部品のみの組み替えで対応でき、多様なセグメントスクリュを組み合わせることで最適なスクリュ形状を構成できるメリットを有した(写真12)。

写真12 六角軸を採用したセグメントスクリュピース
(第五世代TEXまで採用)

1988(昭和63)年ごろ、ポリマーアロイやエンジニアリングプラスチックなど、二軸押出機の優れた混練性能を活用したコンパウンド技術が主流となり、TEXシリーズが多くの顧客に採用された。また、市場ニーズから高能力化への要求がさらに高まり、スクリュの溝深さを拡大し空間ボリュームを増加した、いわゆる深溝化へと発展した。TEXシリーズにおいては、この頃が第四世代に位置し、押出量

が飛躍的に増加した。なかでも、化学反応を伴うポリマーアロイやリアクティブプロセシングなどの混練技術の研究開発が活発化したが、このプロセスではスクリュのセルフクリーニング性が有効であったことから、二軸押出機の主流は異方向回転式から同方向回転式へと移行し、1990（平成2）年頃からTEXは同方向回転式の納入実績が増加していった。図4にTEXシリーズの西暦年ごとの納入台数を示すが、異方向回転式から同方向回転式へ移行していく様子がよくわかる。

2.2.3　二軸同方向回転押出機

1993（平成5）年、バブル期崩壊後の経済停滞時期による一時的な受注減少が見られたが、この時期に様々な差別化技術を開発した。そのひとつにTEXの混合分散性能を従来以上に向上できる特殊混練シリンダの開発が挙げられる。これはNICと称する独自の混練シリンダであるが、シリンダの内面に特殊な形状の溝を加工し樹脂に伸張流などの変化に富んだ流れを付与することで、混合分散性能を向上させるものである（図5）[5]。この技術は粘度比が大きな二成分以上の樹脂原料を混練分散するポリマーアロイやポリマーブレンド、また微粒子フィラーを樹脂に混合分散するマスターバッチ分野などで多くの実績を上げている。

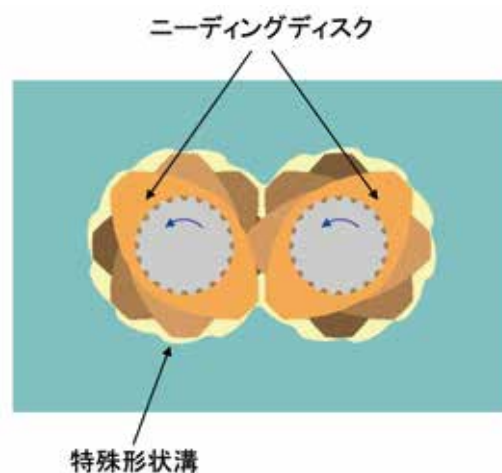



図5　NICシリンダの断面形状

一方で、フィラーコンパウンドにおいてフィラーの混合分散性能と搬送能力を向上させるTKD（ツイストニーディングディスク）を開発した[6][7]。これは、従来のニーディングエレメントのチップ部にリードを持たせたもので、ディスク間の漏れ流（リークフロー）が従来のニーディングエレメントに比べ低下するため、高い搬送能力が得られることを特徴としている（写真13）。その高い搬送能力が混練領域の樹脂圧力上昇を抑制できるため、フィラーの二次凝集の発生が抑えられる。また、漏れ流（リークフロー）の発生により樹脂が繰り返し受けるせん断作用が低減されるため、樹脂温度が低下し粘度が高く維持された状態でのフィラーとの混練が可能となり、良好な混練分散効果を得ることができる。

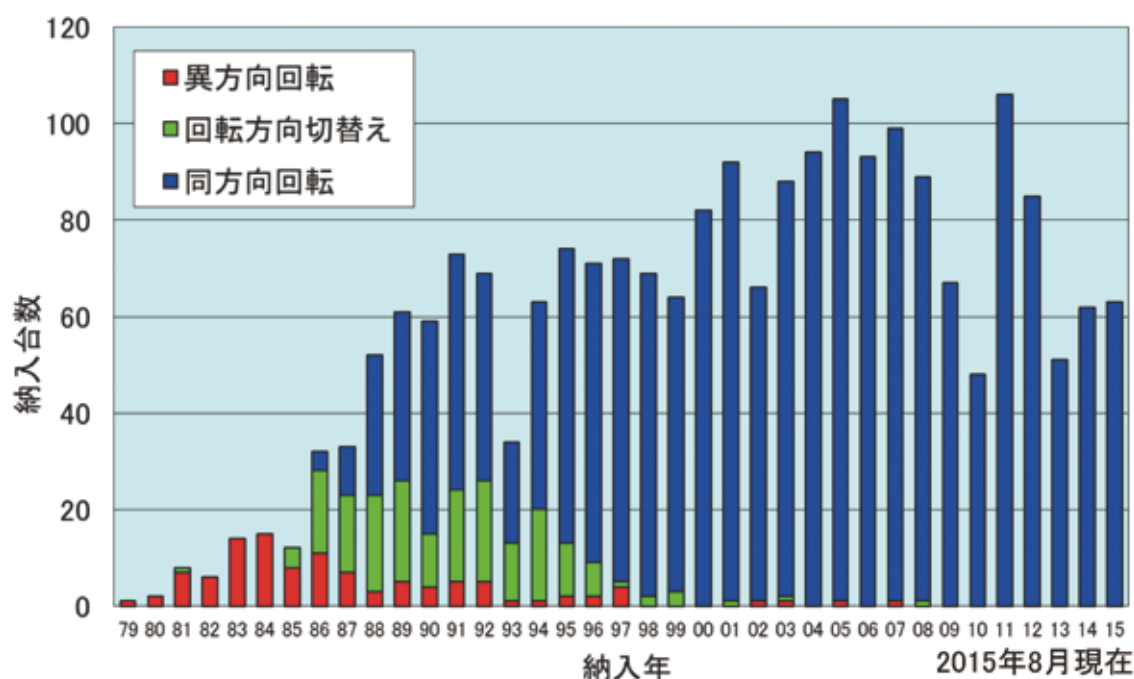



図4　TEXシリーズの納入台数の変遷

写真 13　TKD（ツィストニーディングディスク）外観

写真 14　世界最大級 TEX400 の外観

1994（平成 6）年から 1997（平成 9）年にかけて、TEX シリーズは第 6 世代の TEX-XCT から第 7 世代の TEX-αに進化し、さらなる発展を遂げた。主な開発技術は、高トルク化とスクリュの深溝化であるが、それらを達成するため、スプライン形状を採用したスクリュ軸を開発した。トルクは第一世代と比較すると 2 倍以上に増加し、それに伴い押出量も 2 ～ 3 倍へ増大した。表 1 に歴代 TEX シリーズの技術変遷を示す。TEX は 1979（昭和 54）年の上市に始まり、第 8 世代の TEX-αⅡまで進化した。納入台数は 2000（平成 12）年には 1000 台を越え、同年には脱揮押出機として TEX400 を納入した（写真 14）。これはスクリュ径が 443mm、スクリュの全長は 17m を超える、現在でも世界最大級の二軸スクリュ押出機である。2005（平成 17）年には年間受注 100 台の大台を突破、更に 2006（平成 18）年には納入台数 1500 台に達した。

当社の樹脂機械製品の中での TEX シリーズの位置付けを図 6 に示す。TEX シリーズは押出機のみでなく、周辺システムの研究開発にも注力してきた。重量式フィーダーなどの原料供給装置、ギアポンプ、各種カッティング装置などの二軸スクリュ押出機の上下流装置の開発を手掛け上市してきた。特に、原料供給装置は周辺機器の中でも重要であり研究開発に力を注いだ。図 7 は当社重量式フィーダーの開発ロードマップを示したもので、最近では清掃性向上に貢献するボウル式フィーダーの開発を行った[8]。

また近年、繊維強化熱可塑性樹脂複合在の成形において、様々な新プロセスの開発が活発化しているが、特に大型の構造部材の成形性に優れる LFT-D（Direct Long Fiber Thermoplastic）プロセスに対する期待が高まってきている。

LFT-D プロセスは、GF（ガラス繊維）あるいは CF

表 1　歴代 TEX シリーズの各種特徴

世代・形式	第1世代 S	第2世代 SS	第3世代 C	第4世代 HCT	第5世代 XCT	第6世代 α	第7～8世代 αⅡ (i-TEX)	第9世代 αⅢ
西暦年	1979-1984	1985	1986	1987-1989	1990-1993	1994-1995	1996-2011	2012-現在
減速機	異方向回転	同異切替式	同方向回転	同方向回転 HIGHﾄﾙｸ	同方向回転 SUPERﾄﾙｸ	同方向回転 SUPER HIGHﾄﾙｸ	同方向回転 ULTRA HIGHﾄﾙｸ HIGHｽﾋﾟｰﾄﾞ	同方向回転 ULTRA HIGHﾄﾙｸ HIGHｽﾋﾟｰﾄﾞ
スクリュ	1本物ネジ継ぎ	浅溝2・3条 セグメント 6角軸	浅溝2・3条 セグメント 6角軸	深溝2条 セグメント 6角軸	超深溝2条 セグメント 6角軸	超深溝2条 セグメント スプライン軸	超深溝2条 セグメント スプライン軸	超深溝2条 セグメント スプライン軸 (新製法)
シリンダ	ランダム・ロング	ブロック	ブロック	ブロック	ブロック	ブロック NIC(オプション)	ブロック NIC(オプション)	ブロック NIC(オプション)
制御	―	―	―	―	―	EXANET 重量式フィーダー	EXANET 重量式フィーダー NET100	EXANET 重量式フィーダー NET100
TEX65トルク(N・m) (増加率)	1911 (100)	2489 (130)	2489 (130)	3185 (167)	3499 (183)	4018 (210)	4803 (251)	6741 (353)

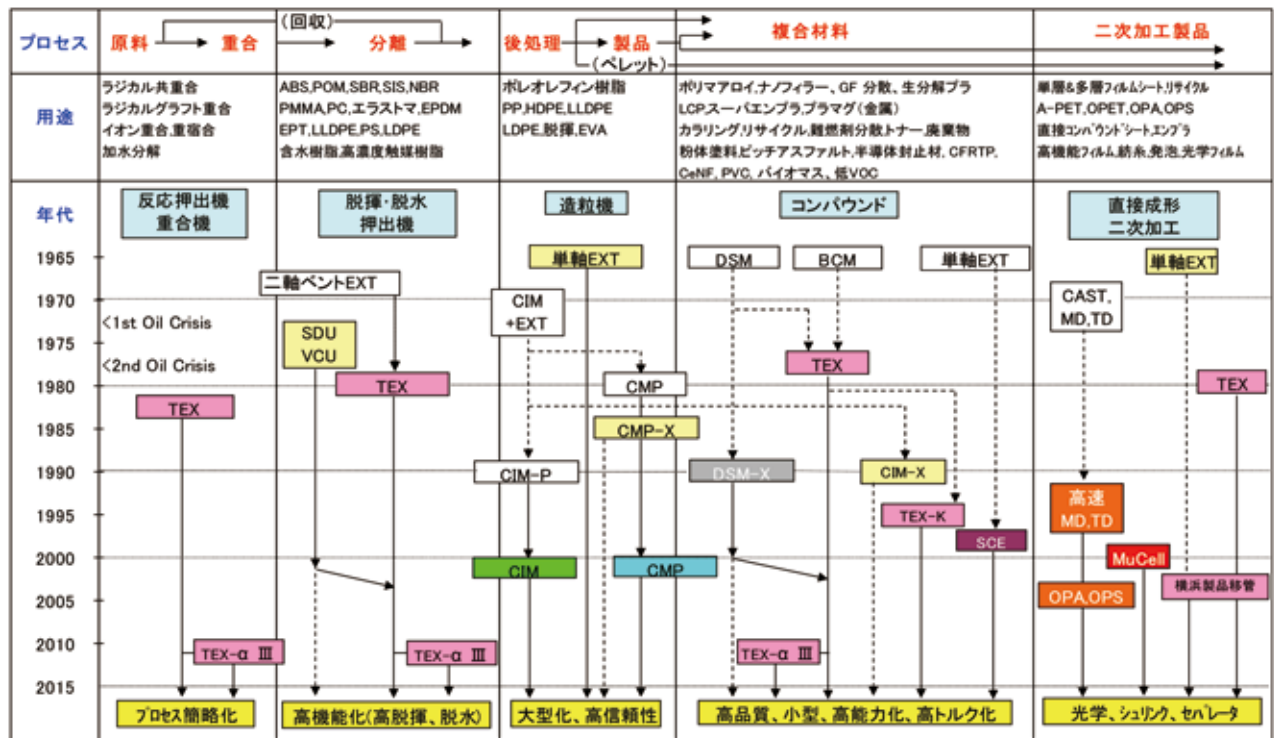



図6　樹脂機械製品の開発ロードマップ

図7　原料フィーダーの開発ロードマップ

（炭素繊維）のロービングを二軸押出機 TEX に直接供給し、特殊な混練スクリュにより繊維長を維持したコンパウンドを行い、その後ダイスからシート状あるいは塊状で押し出し、溶融状態のまま所定の長さに切断後、プレス成形機で最終製品に成形するプロセスである（図 8）。

当社は 2013 年に名古屋大学東山キャンパス内に設立された NCC（ナショナルコンポジットセンター）に CFRTP（炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材）用 LFT-D システムの要である二軸押出機 TEX を納入し、本機は現在 CFRTP 用 LFT-D に関する技術開発に活用されている。

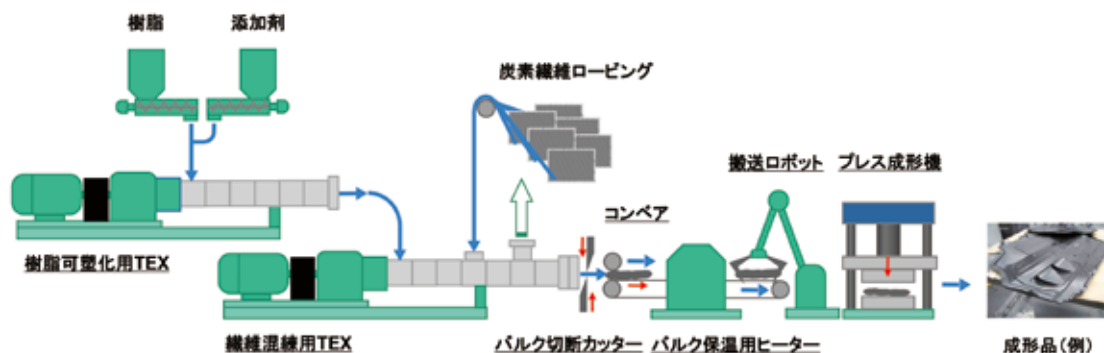



図 8　LFT-D システムフロー外略図

2.2.4　TEX- αⅢシリーズの開発[9]

図 9 に TEX65 におけるオレフィンコンパウンドの代表的処理量の世代別推移を表す。1997（平成 9）年頃から 2000（平成 12）年にかけて小型 TEX シリーズの処理量は飛躍的に向上した。市場ニーズにより、ダウンサイジングや高能力化の要求が高まり、現在では同口径で比較した場合、第一世代の約 10 倍に匹敵するほどの処理量にまで進化したが、多品種少量生産に対応するための操作性の向上と大容量化への要望は現在でも急速に高まってきている。これらニーズに対応するため、2011（平成 23）年にさらなる数々の新しい設計製造技術を導入した新シリーズ TEX-αⅢを開発した（写真 15）。

TEX-αⅢは、従来の TEX-αⅡより駆動トルクを 36%向上させた世界最高水準の高トルクコンパウンド用二軸押出機である。ラインナップは TEX25αⅢから TEX120αⅢまでの 8 サイズである。

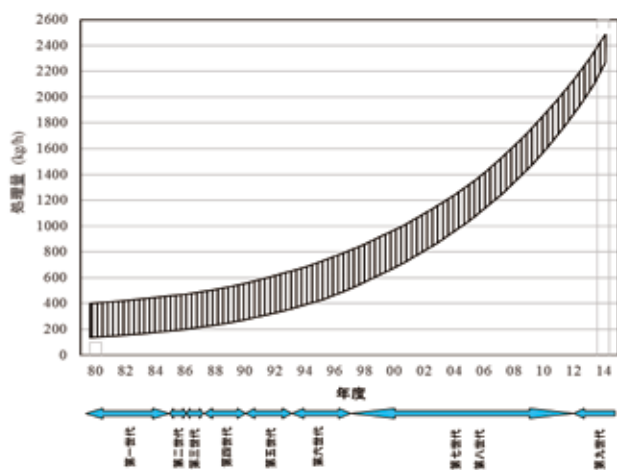



図 9　TEX65 におけるオレフィンコンパウンドの処理量の変遷

写真 15　TEX-αⅢシリーズ（54αⅢ）

TEX-αⅢのターゲットプロセスは、エンプラやスーパーエンプラへのフィラー、GF、CF などのコンパウンディングや、TPV のような高トルク運転を要求するコンパウンディングである。汎用樹脂も含めたこれらプロセスはサイドフィーダ（SF）を併用することが多いが、図 10 に示す新規装置の SFD（Side Feed Deaerator）の活用により高濃度フィラーコンパウンドが可能になっており、低吐出温度も達成可能なプロセス構築が達成出来ている。

TEX シリーズは、上流から下流までのエンジニアリングを含めた Turn-Key でのシステム化を推進している。また、特に海外においてニーズが高まっている据付作業の効率化と低コスト化が図れるモジュールスキッド方式を開発した。図 11 に Turn-Key システム対応の概念図を示す。

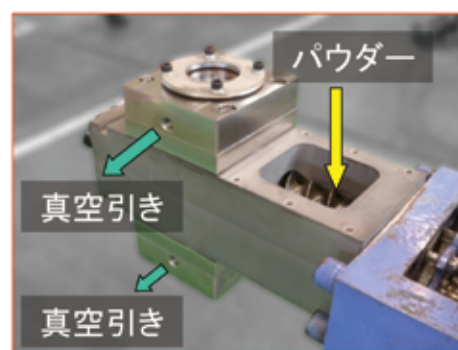
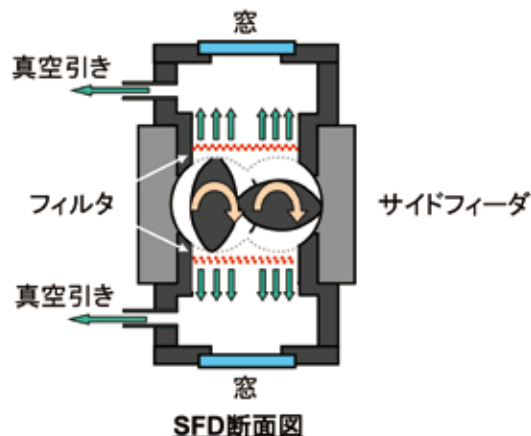



図 10　SFD（Side Feed Deaerator）

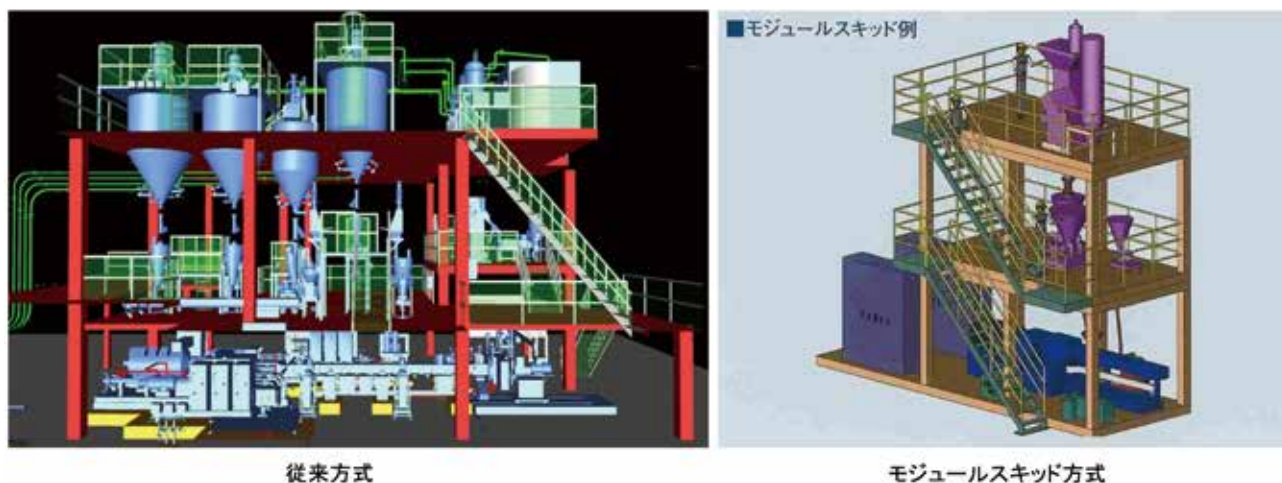



図 11　Turn-Key システム対応の概念図

2.2.5　シミュレーション技術の発展

近年の動向の一つに CAE（Computer Aided Engineering：解析による工学的支援）技術の発展が挙げられる。1990（平成 2）年以前から世界有数の大学や研究機関で二軸スクリュ押出機内の樹脂の流れ挙動などの解析手法が開発されてきた。2000（平成 12）年に入り、コンピュータの処理速度が飛躍的に向上すると、これまで大型コンピュータで時間を掛けて計算していた解析も、パーソナルコンピュータで計算できるようになり、当社でも、シミュレーション技術が飛躍的に進んだ。

2003（平成 15）年には TEX-FAN と名づけた当社独自の二軸押出機挙動解析ソフトを上市し[10]、研究や実験、さらに生産機のスクリュ形状探索のための指標として用いられるようになった。2006（平成 18）年は、脱揮プロセスのシミュレーションモデルを構築し[11][12]、この機能を搭載させた TEX-FAN バージョンアップ版を開発した（図 12）。これは世界に先駆けた試みであり、迅速に解析できる脱揮シミュレーションとして研究開発時や脱揮のスケールアップの検討時に採用されている。また 2014（平成 26）年には 3D 解析機能を搭載した新バージョンの TEX-FAN を上市した。[13]

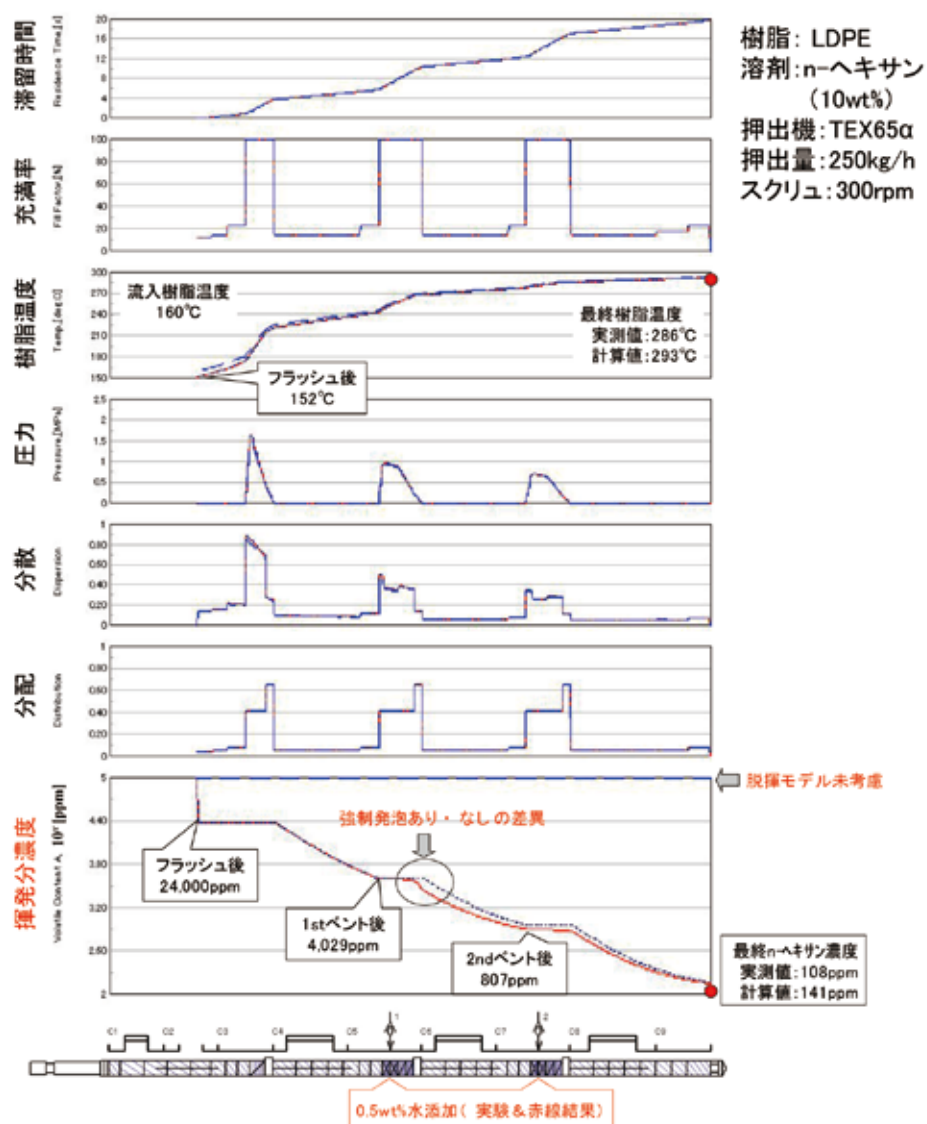



図 12　脱揮プロセス解析を搭載した TEX-FAN 事例

また、最近では粒子法など新たな解析手法が注目されている。粒子法（図13）では従来の有限要素法（FEM）では取り扱えなかった押出機内の非充満領域の解析が可能となりつつあり、今後の二軸押出機内の樹脂挙動の把握のための強力なツールとして期待が高まる。(14)(15)(16)(17)(18)(19)(20)

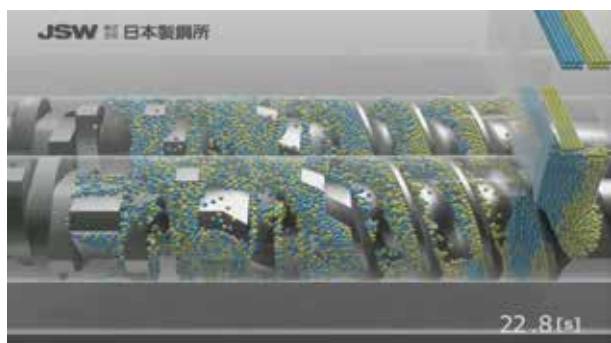



図13　粒子法解析事例

2.2.6　TEXシリーズの今後の展望

これまでTEXシリーズは、コンパウンド製品の高性能化を目的とし開発が行われてきたが、今後は小型機についてはTEX-αⅢシリーズを中心にエンジニアリングプラスチックやスーパーエンジニアリングプラスチックコンパウンドのような高トルク機が必要とされる分野を中心に更なる飛躍を目指している。また自動車部材に多く使用されるTPVのような高機能エラストマーのコンパウンドもTEXシリーズのターゲットとなっている。更に、これまで二軸押出機にて生産されていなかったプラスチックおよびプラスチック以外の新規原料分野への参入を試みる。

これは、現在パドルミキサーや反応釜等のバッチ方式で生産されている製品を二軸押出機で連続生産する方式に転換する技術である。従来の反応釜等のバッチ方式は、十分な反応を得るための長い滞留時間が確保できるが、その反面、滞留時間が長いため生産性が悪く、また釜からの排出時の作業環境の悪さなどが課題とされている。二軸押出機はバッチ式に比べると滞留時間が短いが、スクリュ形状やシリンダの設定温度の最適化により反応性を改善することが可能である。図14にバッチ方式とTEXを使用した連続方式の例を示す。

図14　バッチ式からTEXを使用した連続式へ

また、大型機については、各種プラスチック、ゴム、エラストマーの脱揮、脱水プロセスへの更なる適用分野の拡大を目指す。

2.3　フィルム・シート成形機

2.3.1　概要

当社のフィルム・シート成形機は1959年（昭和34年）にPVCフィルム成形機が出荷されたのがはじまりであり、その後は、二軸延伸フィルム成形機については1962年（昭和37年）頃から開発に着手し、1970年（昭和45年）にはポリプロピレン（PP）の二軸延伸プロセスについてドイツのドルニエ社よりキャストから横延伸装置までの技術提携を受けて生産を開始した。その後当社は独自の技術開発を継続して発展を続け、2001（平成13年）年には横浜製作所を拠点としていた開発・製造部門を広島製作所へ移管が行われ、広島の地で押出機から成形機まで一貫した製品開発・製造が行われるようになった。

2006年（平成18年）には三菱重工業のフィルム・シート成形機事業を買収し、二軸延伸ポリプロピレン（BOPP）の二軸延伸装置・成形技術、高吐出押出技術、無延伸ポリプロピレン（CPP）成形技術などを保有するに至った。そして2015年（平成27年）4月には日立プラントメカニクス（HPM）社より同時二軸延伸装置に関する事業を買収し、逐次二軸延伸技術と同時二軸延伸技術のいずれの延伸技術のニーズにも対応可能な装置ラインナップを有することになった(21)。

2.3.2　ポリエチレンテレフタレート（PET）用押出機

1970年（昭和45年）頃に包装用途向けに約5m幅、ライン速度150m/minの装置でPET用成形機の市場に参入したが、1980年（昭和55年）頃になると磁気テープ用途が主流となり、7m幅、ライン速度350～400m/minまで幅広高速化が進んだ。しかし、記憶媒体が磁気テープから光学系媒体へと急速に変化するとテープの需要が激減し、代わって液晶ディスプレイ（LCD）基材用途の厚物PET延伸シートのニーズが増加し、厚み200μm以上、幅8mクラスへとその要求仕様が変化した。

PETは吸湿しやすく熱に弱いため、事前の乾燥と熱劣化防止、滞留防止が重要である。また、製造工程で発生した耳（エッジトリム）の粉砕品のリサイクルニーズも多い。これらの課題・ニーズに対応するため、1987年（昭和62年）に二軸延伸フィルムのラインに二軸スクリュ押出機TEX120を初めて採用した（リサイクル用途には1983年（昭和58年）に採用）。TEXは、単軸押出機に比べてフラフやフレー

クの供給安定性が格段に高く、かつ高い脱揮性能によりペレットに含まれる水分を効率よく除去できる。そのため、加水分解による固有粘度（IV 値）低下を抑制できるばかりか、未乾燥の PET を直接投入できるようになり、プロセスの大幅短縮を可能にした。図 15 に未乾燥 PET の代表的な直接成形プロセスフローを示す。現在までに TEX30 ～ TEX180 まで多くの納入実績を有している。

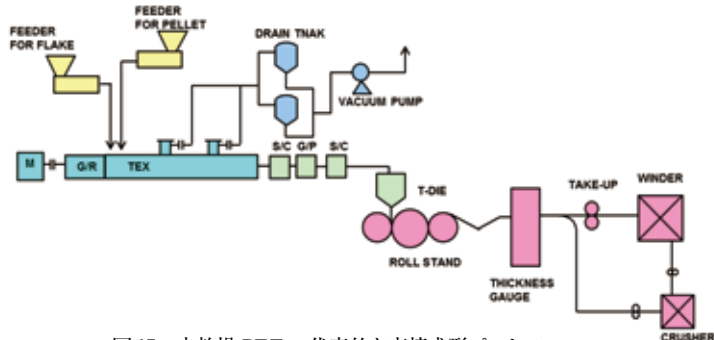



図 15　未乾燥 PET の代表的な直接成形プロセスフロー

2.3.3　二軸延伸ポリプロピレン（BOPP）成形機

BOPP は高い生産性を求められるため、三菱重工業の事業買収後も生産効率を向上させるための装置開発を行なっている。

（1）ライン速度の増大

ライン速度は生産性に最も影響を与える。2000 年（平成 12 年）頃には約 400m/min であったライン速度は年々速度を増し、現在では 500m/min を超え、さらに高速化を目指した開発を行っている。

（2）押出機

三菱重工業ではタンデム型単軸押出機を標準としていたが、二軸押出機が有する高能力かつ低温押出、省スペースの長所を生かし、2006 年（平成 18 年）以降に TEX の標準採用を開始した。また TEX は、高い供給性能と混練能力を有するため、フラフ（エッジトリム）やフレーク原料を直接投入でき、低コスト・省エネルギーでの生産が可能となる。図 16 に標準的なタンデム型押出機と二軸スクリュ押出機のサイズを示す。

（3）T ダイ

当社の T ダイは滞留時間を抑制したコートハンガーダイが主流であったが、三菱重工業は口開き耐性がある傾斜ランドダイを標準としていた。2008 年（平成 20 年）に、これらの特長を組み合わせたハイブリッドダイを開発・上市し、フィルムの全幅厚み均一性や物性の均質性が高まる装置として 2009 年以降多くの販売実績を有している[22]（表 2、図 17 参照）。

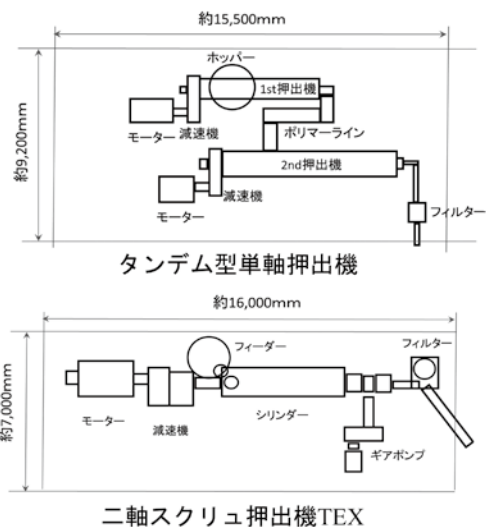



図 16　タンデム型単軸押出機と二軸押出機のサイズ比較
（最大吐出量 約 6,000 kg/h）

表 2　各 T ダイの流路形状と特性比較

	流路形状	ユニフォミティ（厚み精度）	滞留時間（耐劣化性、色替性）	口開き耐性（均一性、低減）
コートハンガー		○	◎	△
傾斜ランド		○	△	◎
ハイブリッド		◎	◎	○～◎

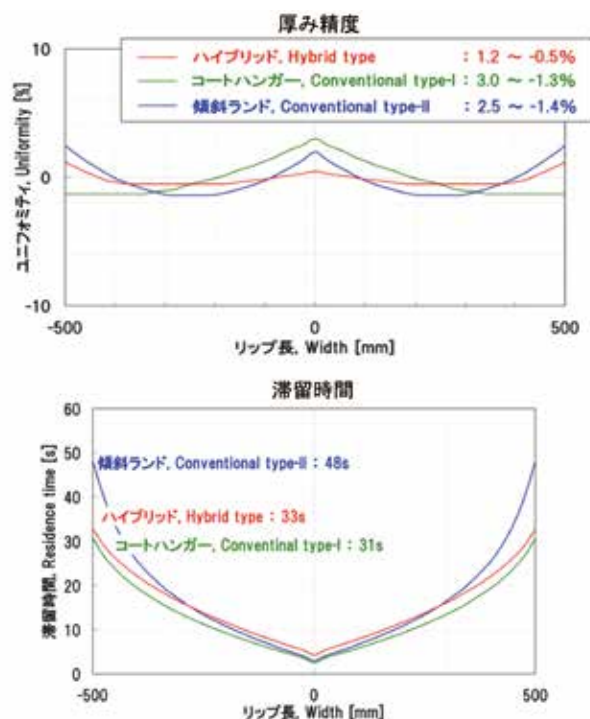



図 17　各 T ダイの厚み精度と滞留時間分布

(4) 横延伸装置

横延伸装置のクリップ開閉機構はクリップレバーを物理的に押し引きする機構であったが、ラインの高速化に伴い、騒音対策やクリップの磨耗・破損防止対策として磁石式のオープナーやクローザーを採用してきた。そして現在では、磁石の磁力を確実に捉えるのに適したクリップ形状が開発され、高速成形時の安定化に貢献している。(図 18、図 19 参照)

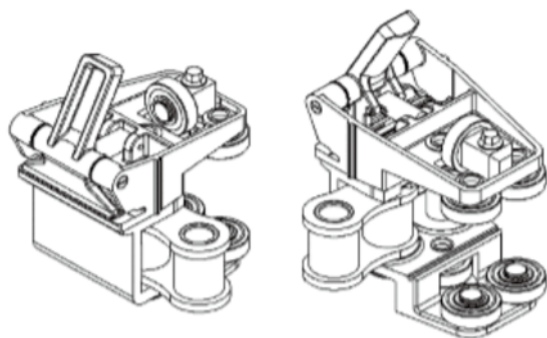



図 18　横延伸用クリップ

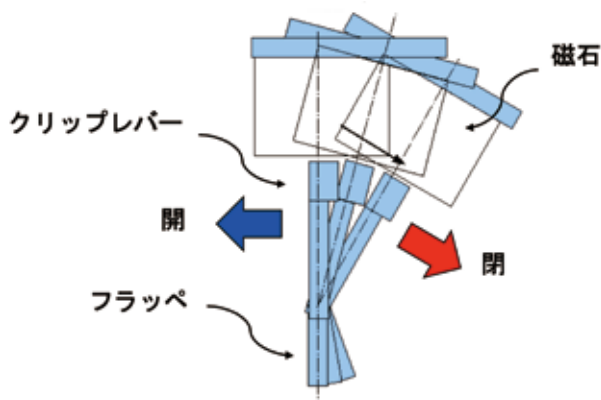



図 19　磁石オープナー・クローザーの機構

オーブン内ではフィルムを効率良く延伸温度まで加熱することが求められる。オーブンの加熱ノズルの形状は、当初スリット状のノズルが主流であったが、高速化に伴い搬送フィルムの随伴気流によって吹き付けられたエアーが倒れ込んで熱伝達効果が低下する課題に直面した。この対応のため、多数の穴からエアーを噴出するホールノズルが採用されるようになり、さらにはより伝熱効率を上げるためのノズル配置の検討を行ってきた。ノズルの形状を改良した結果の一例を図 20、図 21 に示す[23]。等間隔に直線状に配置されたノズルと、千鳥状に穴を配置されたノズルの、フィルム表面への吹き付け圧力（解析値）を比較すると、直線状に配置したものはお互いのエアーが干渉して圧力にムラが生じているのに対し、千鳥配置ではそれが改善できフィルムへの熱伝達率が 15%向上した。現在はさらにきめ細かな制御を行うため、上下ノズルを別温調するシステムも採用されている。

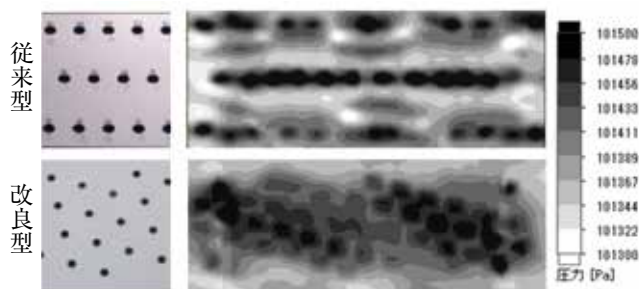



図 20　ホールノズル形状とその配置の違いによるフィルム面への
エア吹き付け圧力の比較（解析値）

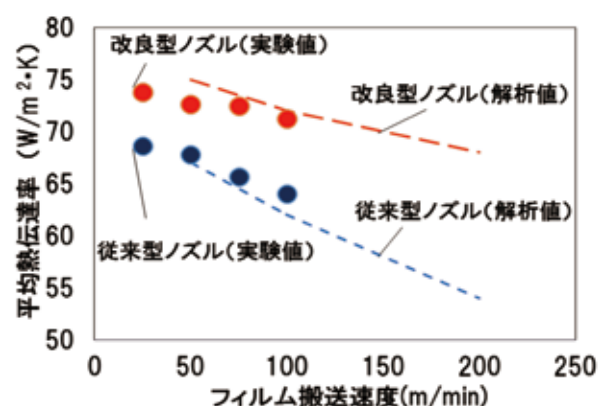



図 21　ホールノズル形状とその配置の違いによるフィルムへの
熱伝達率の比較（ノズルエア吹出し速度 20m/s 温度 120℃）

(5) 引・巻取機

高速化は引・巻取装置に大きな影響を与える。特に巻替えの際に生じる小さな段差は、楕円のまき姿を形成し、それが原因で生じる振動は、楕円のまき姿をさらに成長させ、大きな振動へと発展していく。そのため、巻替え時の段差やシワの発生を抑制するのはもちろんのこと、初期の微細な振動を抑制するため、図 22 に示す引・巻取装置のナローギャップロールやライダーロールの改良、ダンピング用ダンパーの能力向上、フレーム剛性の向上などの改良を実施し、振動低減に努めている。

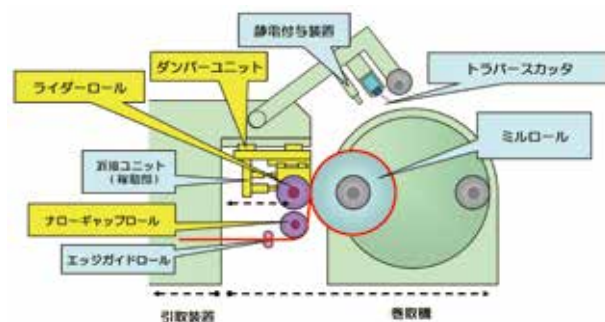



図 22　巻取り装置の概略図

2.3.4　セパレータ製造装置

スマートフォン・タブレット端末や電動工具、電気自動車などが大容量・高出力のリチウムイオン電池を採用するようになり、そのニーズは増加の一途をたどっている。リチウムイオン電池のセパレータフィルムは、フィルムに開いた微細孔が電池性能や電池の安全性に大きな影響を与えるため、微細孔分布や強度、耐熱性などを如何にコントロールするかがポイントとなる。

セパレータの製造方式には、高分子量PEとパラフィンオイルとを均一化して成形し、最後にパラフィンオイルを除去して開孔させる「湿式法」と、PEやPPを配向させながら結晶化を進め、縦延伸装置で結晶間を開孔させる「乾式法」がある。

(1) 湿式セパレータ用成形機

湿式セパレータフィルム製造プロセスの特徴は、基材樹脂である高分子量PEと一緒に、多量の流動パラフィン(LP)を供給して均質化する点にある。LPの役割は、PEを膨潤させて可塑化を容易にしたり、LPを除去した後に形成される微細孔を形成させたりする点である。流動パラフィンの配合比率は60～70wt%と高いため、PEと均一に混練分散させるために混練性能の高い二軸スクリュ押出機TEXを採用している。

湿式のセパレータ製造装置市場への参入は2004年頃からで、当初は二軸押出機の納入だけに留まっていたが、現在は急速に需要が伸びつつある海外向けにフルラインを提供している。押出機の能力は年々増加を続け、2005年から2015年の間に押出量は3倍以上になった。ライン速度においても、市場に参入した当時に比べ、最近は2倍近いスピードとなっている。フルラインの装置構成を図23に示す。装置はTEX、CAST装置、縦延伸装置(MDO)、第1横延伸機(1stTDO)、抽出槽、第2横延伸機(2ndTDO)、引・巻取り装置から構成されている。同時延伸装置を採用する場合はMDOと1stTDOが同時延伸装置に置き換わる。逐次二軸延伸プロセスは、同時二軸延伸プロセスに比べて生産効率が高く増速化が容易であることが大きな特長であり、同時延伸プロセスではフィルムの等方性に優れ薄膜成形に有利とされる点に特徴を有する。

(2) 乾式セパレータ用成形機

乾式プロセスの特長の1つは、原料にPEに比べて耐熱性の高いポリプロピレン(PP)を用いている点である。また、PPの結晶間の延伸により微細孔を開孔させる点が湿式と大きく異なる。乾式については1990年代に単軸押出機を含めた原反製造装置を納入したのが始まり

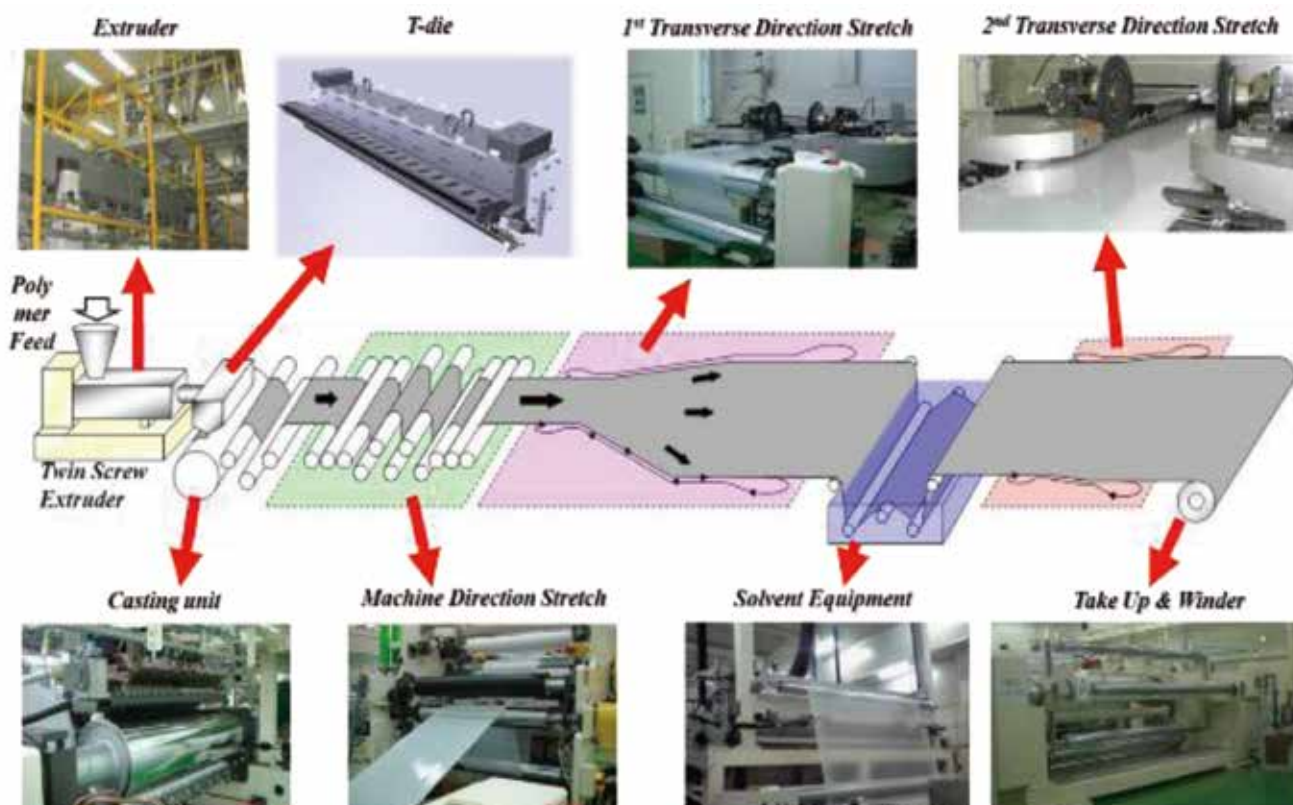
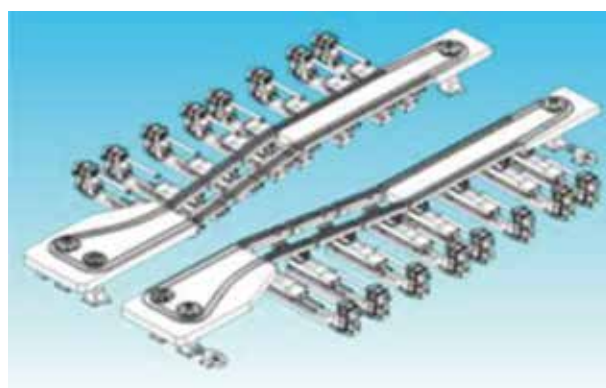



図23　湿式セパレータ製造ラインの装置構成

で、その後も多数の原反製造装置を納入している。PPは耐熱性が高い反面、シャットダウン温度も上がるため、安全装置としての機能が低下する欠点が生じる。そのため、通常はPPとPEのシートを別々に製造して積層体とし、PEでシャットダウンの機能を維持し、PPで耐熱性を向上させている。

乾式プロセスはキャスト成形での結晶配向制御や延伸プロセスでの開孔制御が難しく、プロセス全体の受注が難しかったが、最近では表3に示すように、試作のフルライン設備により、市販のセパレータと同等の性能を持ったセパレータを得ることに成功している(24)。また、生産効率の向上と、より一層の薄膜化のため、電池評価によるセパレータの信頼性に関する情報の提供を目指している。

2.3.5 同時二軸延伸装置

HPM社では、1960年代にあるユーザーと共同でポリプロピレン(PP)向け同時二軸延伸装置の開発を開始したのが始まりで、その後はポリアミド向け専用装置で実績を延ばしてきた。2000年頃からはセパレータ延伸機に参入し、その延伸性能が高く評価された。

一方、その頃から光学系フィルム(位相差フィルム)の延伸工程に同時二軸延伸機の適用が検討され始め、2005年には、独自の機械式倍率変換装置機能付きの同時二軸延伸機を開発した(25)。写真16にテスト用同時二軸延伸装置の外観を、図24に同時二軸延伸装置のリンク機構を示す。

写真16　テスト用同時二軸延伸装置外観

図24　同時二軸延伸装置のリンク機構

表3　各乾式セパレータの特性比較

※25μm換算値，※※産総研関西センター評価

サンプル	PP単層サンプル		貼合サンプル
		電池特性(レート特性)※※	
SEMイメージ	200nm	4.2-2.5 V, 30℃ Charge: 0.2C-rate Cell voltage(V) Discharge capacity(NCM: mAh/g) 10C 5C 3C 1C 0.5C 0.2C 【電池組成】 LiNi0.33Mn0.33Co0.33O2:AB:VGCF:PVDF=91:2:2:5wt.% Guraphite:AB:VGCF:Acrylic=93:2:1:4wt.% 【電池構成】 三元系/グラファイト CR2032Coin-cell 電池容量:2.5mAh/cell N/P=1.1(正極2.5mAh/cm2、負極2.8mAh/cm2) 【試験条件】 高率放電試験 カットオフ:4.2-2.5V、試験環境:30℃(充電0.2C-rate、放電0.2C, 0.5C, 1C, 3C, 5C, 10C)	200nm
厚さ(μm)	11.3		35.1
空孔率(%)	51.8		53.4
ガーレ※(sec/100cc)	419.0		307.7

（1）同時二軸延伸装置の特長[26]

①高い延伸倍率

高倍率用リンク機構を採用しており、フィルムの進行方向（MD方向）、フィルムの幅方向（TD方向）の積で、従来に比べて高倍率延伸が可能である。

②速いライン速度

高性能サーボモータを使用することにより、入口と出口のライン速度制御を可能とし、かつ高速度に対応可能である。

③高い把持力のクリップ

セパレータフィルムのような流動パラフィンを多く含んだフィルムでも確実に把持できるようにするため、ばね力とセルフロック機構を備えている他、フィルム把持部にスリップ防止機能を付加したクリップを採用している。

（2）今後の展望

同時二軸延伸装置の有利な点は、1工程で縦横を延伸できるため、無延伸状態の物性や光学特性を連続して一気に変化させることができることや、ロール延伸などで表面にキズをつけることなく延伸できる点にある。今後は光学用途の高付加価値フィルムのニーズが高まることが予想されることから、同時二軸延伸装置の最大の課題である生産性の向上や更なる高精度化のため、より一層の改善を進める必要がある。また、耐熱フィルムのニーズが高まっていることもあり、高温材料に対応した装置ニーズに対応することも必要である。

2.4　中空成形機

2.4.1　はじめに

図25に中空成形機の技術変遷を示す。以前、2006（平成18）年までの技術変遷を紹介したため[*]、本号では、2007年以降の中空成形機技術変遷について紹介する。

2006（平成18）年11月には株式会社タハラをJSWグループに迎え、中空成形事業のさらなる強化・拡大体制を敷いている。タハラは1969（昭和44）年設立の中空成形機製造の専業メーカーで、特に小型機分野では高い評価を受けている。その実績を踏まえ、2006年以降は小型機（型締力40Ton以下）をタハラ、PFT（Plastic Fuel Tank：自動車燃料用プラスチックガソリンタンク）用中空成形機・中大型（型締量40Ton超え）はJSWが担当することとし、各々の得意分野を生かして中空機成形機事業の更なる拡大を目指すこととした。本技報では2007年以降のPFT用中空成形機および中大型中空成形の技術動向及び最新技術について紹介する。

2.4.2　PFT機　市場動向と最新技術動向

自動車燃料用ガソリンタンクは、全体の約70%がプラスチック（以降PFT）になっており、今後もプラスチック化が進んでいく傾向にある。PFTはその用途からガスバリア性能が必須となっており、そのため中間層にバリア材を必要とする4種6層の多層構造である。バリア材であるEVOHは、オレフィン樹脂に比べ熱劣化しやすい問題を有するため、大型成形で用いられる間欠式（アキュームレータ方式）での対応が難しく、連続押出式の中空成形機構成となる。JSWとして、これまでに1998年（平成10）年に上市して以来、現在までに60台（ダブルステーション10台、シングルステーション50台）の納入実績を有している。

PFT技術の変遷としては、2008（平成20）年から第2世代PFTとして、従来の成形機を移送する方法から成形機を固定として、パリソンをロボットにて搬送する技術、円周方向の肉厚を変化させることによる成形品肉厚の均一・軽量化（ラジアル肉調）技術を開発・上市した。

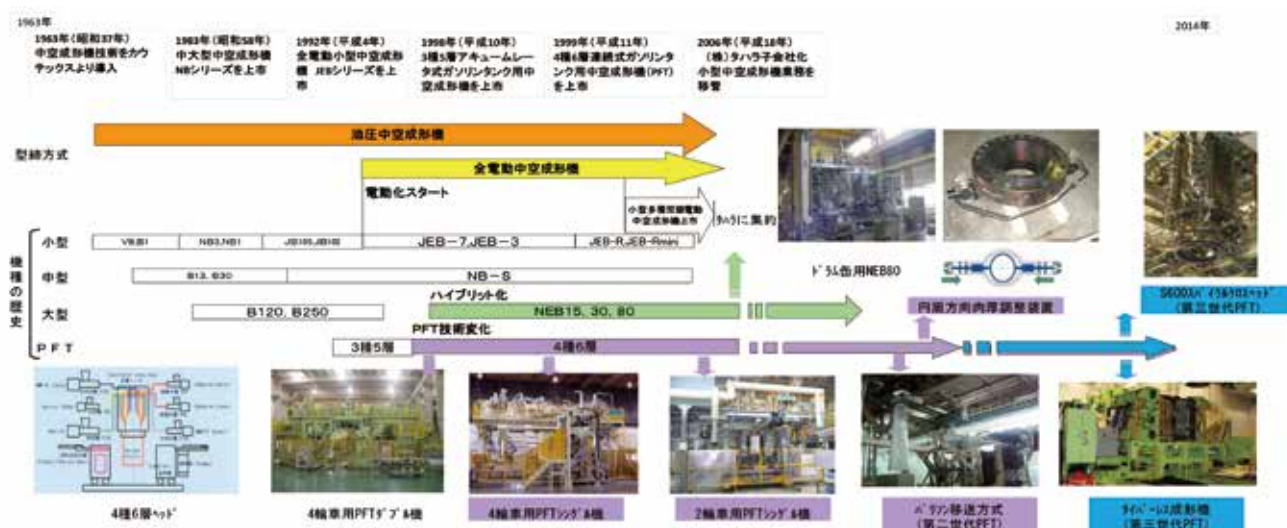



図25　中空成形機の技術変遷

現在は、第３世代 PFT として以下新技術を展開しており、その最新技術について紹介する。

①NHB -120 型タイバーレスハイブリッド型締装置[27]

従来の型締装置は、油圧駆動のみであったが、2011（平成 23）年に上市した新型成形機は電動駆動と油圧駆動を組み合わせたハイブリッド駆動成形機であり、省エネ、ハイサイクル、軽量・コンパクトを実現した。図 26, 図 27 にその特徴と従来機との駆動方式の違いを示す。

②スパイラルクロスヘッド[27][28]

ＰＦＴ中空成形機では、成形のために４種６層のパリソンをクロスヘッドにて形成する。従来では内部樹脂流路をコートハンガー型と呼ばれる比較的大きなサイズのクロスヘッドを採用してきた。近年の省エネ、使用樹脂量の削減等の環境設計への対応から 2009（平成 21）年よりスパイラル型のクロスヘッドの開発に着手した。各種解析や検証テストを経て 2010（平成 22）年に上市したスパイライルヘッドは、従来

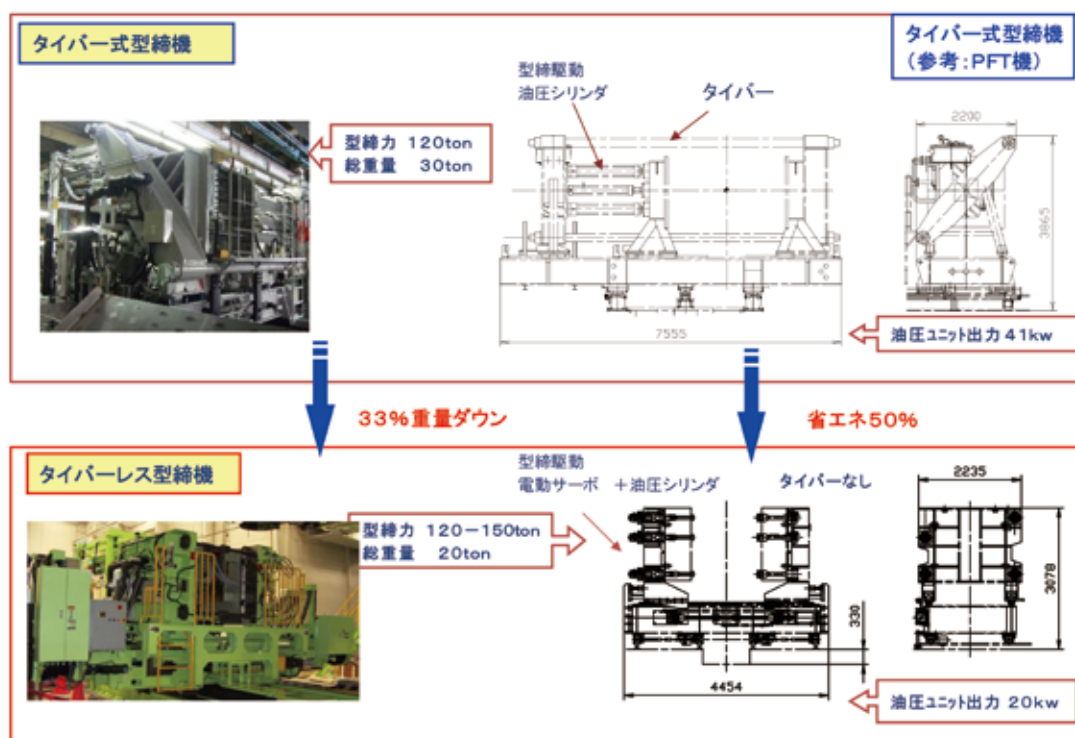



図 26　従来機（タイバー式）と新型機（タイバーレス式）の比較

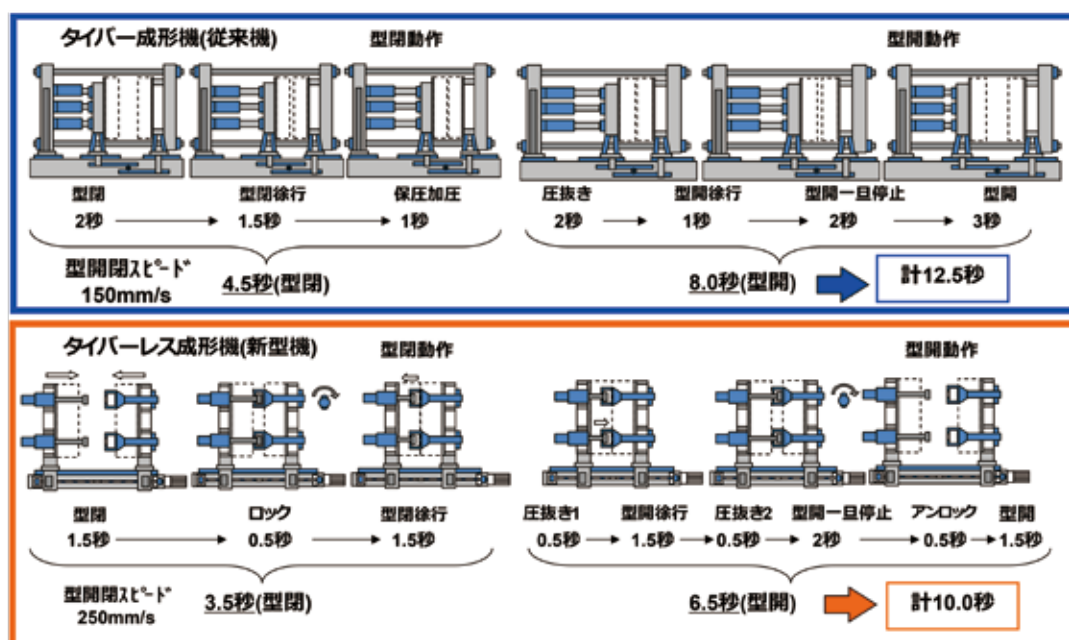



図 27　従来機と新型機の駆動方式の違い

タイプとの比較において、厚み精度・樹脂置換性・ヘッド本体の軽量化・消費電力削減に大幅な改善効果を得ることができ、標準クロスヘッドとして採用している。

③低温高分散型スクリュ

4種6層のPFT成形でのバリのリサイクル層は4種類の樹脂を含むが、そのリサイクル材の押出しでは、バリ中に含まれるEVOHを微分散させることが重要である。EVOH自体は機械強度が低く、大きな固まりで存在することはPFT自体の内部欠陥となるため、強度に影響を及ぼさない程度まで微細化し、なおかつ均一に分散させる必要がある。このため、リサイクル層の押出機では特殊形状のスクリュを採用することで、EVOHの粒度は目標値の10μm以下が達成できている。

④ラジアル方向肉厚調整装置[29]

成形品の肉厚の均一化は、a)使用材料削減、b)軽量化、c)冷却時間短縮、のメリットが大きい。標準装置であるアキシャル方向の肉厚制御は、パリソンの流出方向での肉厚制御であり、円周方向、すなわち、パリソンが最も伸長され薄肉になりやすい成形品のコーナー部などの円周方向での厚薄差の制御には対応できず、ラジアル方向専用の肉厚調整装置が必要となる。この装置の外観を写真17, 図28に示す。この特長は、柔軟性を持たせたダイ外筒リップをアダプター軸を介して油圧サーボシリンダにより0～±2mm程度変位させる。これによりパリソン周方向の肉厚調整が可能になり、成形品コーナー部の肉厚均一化が図られる。現在は更なる成形品の均一肉厚化・成形品重量軽量化のための新型ラジアル肉調装置の開発を進めている。

写真17　肉厚調整装置

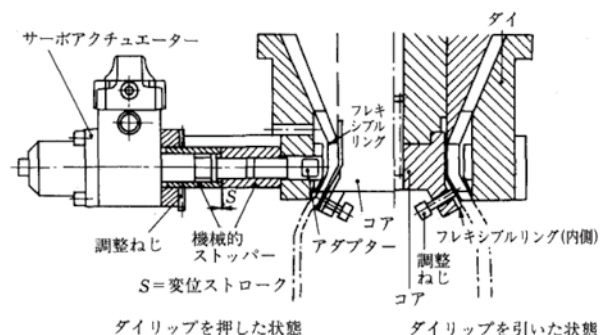



図28　肉厚調整装置

⑤内部インサート成形技術

地球温暖化防止対策が世界的規模で叫ばれるなか、CARB（カリフォルニア州大気資源局）のPZEV（Partial Zero Emission Vehicle）プログラムに代表される炭化水素の排出量規制の強化にガソリンタンクも対応が求められている。通常の4種6層ガソリンタンクは、中空成形後の後工程で複数の開口部が設けられ、外側からポンプユニット、バルブやチューブといった構成部品が取り付けられる。そのため、その取り付け部でのシール性の確保や、構成部品の材料による炭化水素の透過性抑制により、その規制に対応している。

一方、構成部品をタンク内に設置することにより、タンクの開口部の数を抑え、構成部品に特別な配慮も必要なくなるということから、多層ガソリンタンクの成形時に構成部品の内部への取り付けも同時に行う内部インサート成形の実用化が進んでおり、内部インサート装置、金型同期制御、ツインシート成形対応が差別化技術として開発・適用を進めている。

⑥新制御システム

昨今の大型中空成形機は、システムが多岐に渡り成形手段も複雑化している。そこで、操作性を容易にしシステム監視とプロセス制御も実施するために、プラントの世界では多用されているSCADA（Supervisory Control And Data Acquisition）を採用し、HMI（Human Machine Interface）としてパネルコンピュータを用いることとした。これにより、オペレータは成形機の多様なプロセスを監視しながら複雑な成形条件を容易に設定することが出来るようになり、また成形条件（レシピ）やプロセスデータもHDの容量限界まで大量保存が可能になった。また、本システムには遠隔診断機能も付加することができ、社内に居ながら現地のPLCをオンラインで閲覧出来るようになっている。これにより、装置の状況・プロセスデータをリアルタイムで確認することができ、トラブル時の早期解決に繋がっている。

さらに、HMIにはスマートフォンやタブレットにおいては一般的なフリック・ピンチイン・ピンチアウト機能を追加し、また別付けのタブレット（Wi-Fi通信による）も設置し機械の周辺の至る所からの操作も近々可能とする予定である。

2.4.3　中・大型中空成形機　市場動向と最新技術動向

1965（昭和40）年から危険物輸送容器として高密度ポリエチレン製灯油缶が認可され、それ以降大型中空成形品の開発が活発となり、1980年頃のソーラーシステム関連部品やプラスチックドラム缶、1995年に危険物輸送に使用になったIBC（容量450L～3,000Lの個別輸送に使用される容器）など、大型の中空製品の製品範囲が広がった。大型中空成形が可能となったのは、パリソンが自重で伸びてしまうドローダウン現象への対応として、材料は耐ドロ

ーダウン性のある溶融粘度の高い超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)が使われるようになり、装置としては、樹脂を貯蔵して一気に押し出すアキュームレーターが導入されたことによる。これらの大型中空成形技術に関連する最新のJSW技術の現状を紹介する。

①中・大型中空成形機用押出機(スクリュ)[(29)(30)]

大型中空成形機の押出機の技術課題は、

a) UHMWPEの高い粘度により発生する背圧に打ち勝つ高い推進力

b) 生産のサイクルタイムの短縮と、製品の冷却後のひずみを抑制するための過度な樹脂温度上昇の防止

c) 混練の均一化(偏肉問題)

d) 大きな圧力変動(サージング)の無い押出安定性(サイクル安定)

である。当社のスクリュ形状は、それらの課題要求に対して、社内テスト機による検証、解析技術を駆使して開発を行っている。UHMWPE用に開発されたスクリュは、押出量を確保した上で樹脂温度の発熱を抑え、高混練を実現したスクリュである。

②アキュームレーター方式クロスヘッド[(29)(30)]

大型中空成形機用に使用されてきたアキュームレーターヘッドは、リング状のピストンを内蔵し、ヘッド内の樹脂貯蔵室に溶融樹脂が設定容量に達すると油圧シリンダで短時間にパリソン状に押し出すためのものであるが、コアの中央部は油圧シリンダとコアを連結する肉厚調整装置の軸が挿入されるため、ほとんどが押出機からの溶融樹脂をヘッドの側壁から供給するクロスヘッド方式である。

図29は大型アキュームレーターヘッドの全体断面構造図である。アキュームレーターヘッドの技術的課題は、

a) 材料の色替え時間短縮および内部での滞留熱分解の防止

b) パリソン上に現れるウエルドラインの防止

c) 分解清掃性(メンテナンス性)

d) パリソン円周方向の肉厚精度

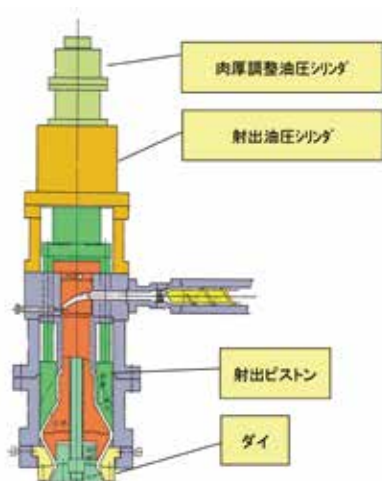



図29 大型アキュームレータ

などであり、これらの課題に対応するためにヘッド内の流路をPFT同様に従来のコートハンガータイプからスパイラルタイプへ変更している。また、多層要求に対してヘッド内の樹脂貯蔵室に予め多層を形成しパリソンを成形することにより、制御性を改善したコンパクトな多層アキュームレーターヘッドも開発し上市している。

③電動中空成形機

省エネ・クリーンの要求から、1995(平成7)年に中型(型締力15～30Ton)電動中空成形機のNEBシリーズを上市した。本機は射出成形機に採用されているトグル機構を用いて電動駆動した成形機であった。その後のニーズから大型中空成形機NEB80を開発したが、本機は成形機の駆動機構をトグル式から直動式に変え、型完閉時におけるトグル特性に依る速度低下を改善した機械である。現在は更なる大型を実現するために電動と油圧の長所を生かしたハイブリッド方式での成形機も上市しており、今後も省エネ・コンパクトな成形機の開発を進めている。

2.4.4 中空成形機の将来展望

これからの中空成形機市場は、「省エネ」「省資源」「ハイサクル」「省スペース」をキーワードに、環境にやさしい機械が必要とされている。今年、新たに設備化した社内テスト機では、これらキーワードの環境対応を踏まえた第3世代PFT中空成形機の機能を搭載しており、次期中空市場への対応力を明確に示すことが可能な装置となっている。

今後も、欧州および国内の有力タンクメーカにおける世界規模での生産拠点拡大やアジアローカルタンクメーカーからの需要増大が見込まれている。着実に受注を増やし「世界No.1中空成形機メーカー」の目標達成に向け、さらなる工夫と改善を盛り込みつつ、新テスト機による拡販および新技術開発を進める所存である。

2.5 押出機の制御システム

2.5.1 押出機制御システムの変遷

押出機における制御システムは、運転停止やインターロックを司るリレー回路とプロセス制御を司る調節計を制御盤に搭載したものが始まりである。1985(昭和60)年頃から、LSI技術の進化とともにロジック制御とアナログ制御が統合され、集中監視制御を可能とするコントローラや工業用パソコンが市場に出始めてきた。造粒機は石化大手が顧客でありプラント志向が強く、分散型制御装置(DCS)の採用からPCベースの制御装置(PCステーション)を採用した。

当社では、監視制御システムを開発するためのSCADAパッケージを1997(平成9)年から採用し運転監視しやすいカスタム画面の開発を行い、更に現場操作盤のタッチパネル化に伴い、安全且つ円滑な立ち上げを実現する画面も開発した。その後においてもシステム機器の構成は同様で

あるが、近年個々の制御機器の機能向上が図られている。一例として計装品自身が通信機能も有するスマート計器を押出機に搭載し、それら計器との通信機能を有する制御システムが採用されている。また、ＰＬＣを用いた制御システムにおいては、システムの冗長化（２重化構成）、安全ＰＬＣを搭載したシステムにて対応する事が求められている。図 30 に造粒機制御システムの変遷を示す。

一方コンパウンド製造用押出機は、顧客が自社標準に拘らず、機械と一体でユニット化したものが好まれるため、我社のコントローラを搭載したものが主流となっている。TEX シリーズの第五世代より世代更新とともに専用コントローラである EXANET も、画面のカラー化、処理速度の高速化、タッチパネル化と進化を遂げてきた。図 31 に EXANET コントローラの変遷を示す。

2.5.2　押出機制御システムの将来展望

インターネット環境の発達により工場の内外問わず全ての機器がリアルタイムに繋がる環境においては遠隔保守を目的としたリモートメンテナンスにより稼動状況の確認が容易になるため早期の故障検知という技術の運用が求められてくる。現在の技術にてこれらの機能については対応可能なレベルとなっているが、情報の安全性を確保できる運用方法が課題であり、今後検討を進めていく。

この様に最新のＩＴ技術を用いた予知保全機能を搭載することで我社の押出機の機能向上を図って行きたい。

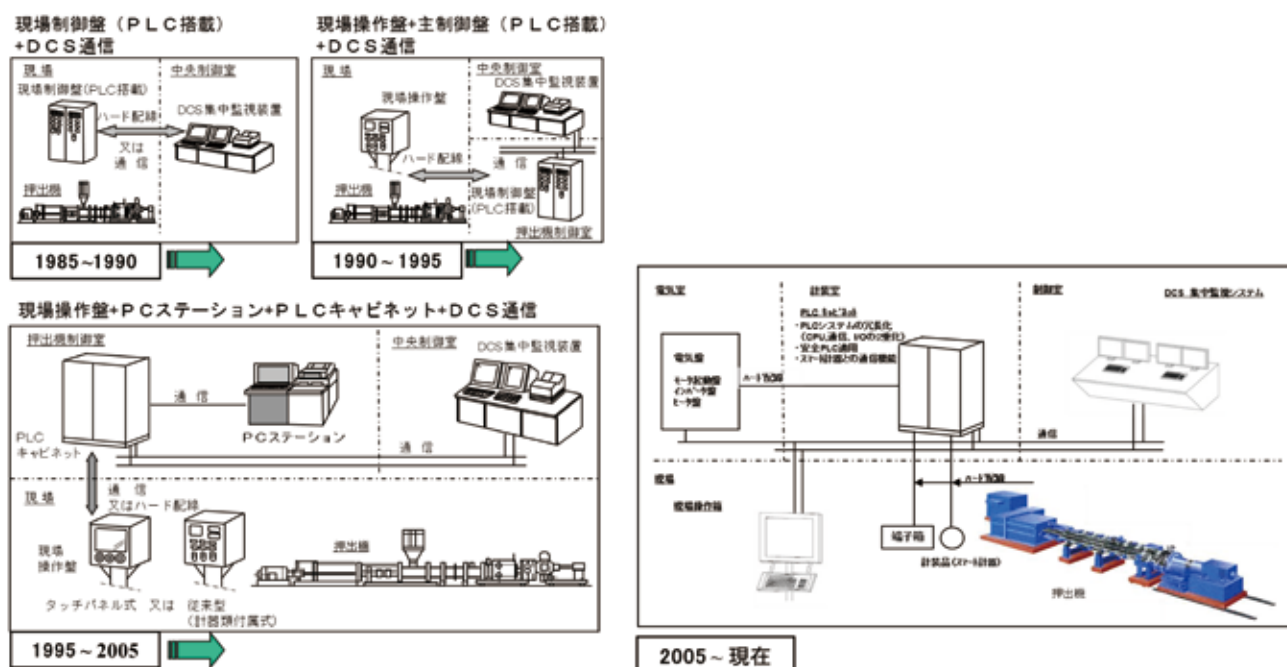



図 30　造粒機制御システムの変遷

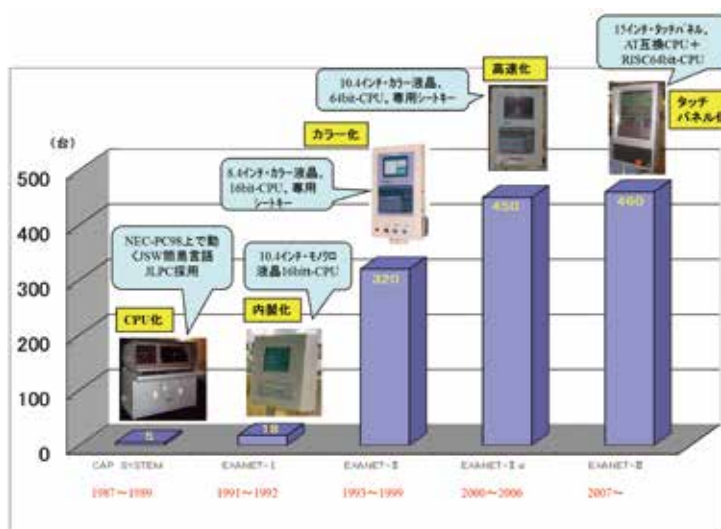



図 31　EXANET コントローラの変遷

3. 結　　言

樹脂原料製造用造粒機、コンパウンド製造用押出機、フィルム・シート成形機及び中空成形機についての60数年に亘る技術の変遷と将来展望を解説してきた。

新興国市場の伸長ならびにシェールガスの影響による米国市場の復活を筆頭として、世界的な景気回復基調に支えられ今後もプラスチックの時代は続くと考えられるが、原油価格の高騰化、グローバル化の定着、情報技術の高度化、RoHS規制強化や環境問題など我々を取り巻く環境の変化は著しく、今後も樹脂機械も厳しい道程を強いられるであろう。これらの困難に立ち向かう為、先輩諸氏が築いて来た樹脂機械の良き伝統を守り、更なる技術の向上で当社のブランド力を高める事により、世界の樹脂成型加工機械メーカーの中で不動の地位を築いて行く所存である。

参　考　文　献

(1) 日本の石油化学工業 1963年版
(2) 水口、大越、水谷：ポリオレフィン樹脂造粒機の高能力化と省エネルギー化，日本製鋼所技報，44号
(3) 池谷等：日本製鋼所技報，61号 (2010)，p84
(4) 高本等：特許第4955795号 (2010)
(5) 織田、吉田、水口、住田等：特許第3224931号 (2001)
(6) 石橋：特許第3746996号 (2005)
(7) 柿崎、小田、新谷：特許第3768210号 (2006)
(8) 樹脂原料フィーダー，日本製鋼所技報，55号 (2004) p198
(9) 住田、友光、佐賀、東定、清水、小舘、石橋、柿崎、井上：日本製鋼所技報，64号 (2013)，p56
(10) 富山秀樹、石橋正通、井上茂樹：日本製鋼所技報，55号 (2004)，p32
(11) 高本、富山、新谷、井上：日本製鋼所技報，57号 (2006)，p62
(12) 富山、高本、新谷、井上：成形加工，19号，(2007)，p565
(13) 福澤、富山：成形加工シンポジア’14，(2014)，p45
(14) 富山、宗正、安江、重石、室園：日本製鋼所技報，62号，(2012)，p81
(15) 富山、福澤、重石、宗正、室園：成形加工シンポジア’12，(2012)，p387
(16) 富山、福澤、重石、宗正、室園：成形加工’13，(2013)，p257
(17) 福澤、富山、柴田、越塚：日本製鋼所技報，64号 (2013)，p22
(18) 福澤、富山、柴田、越塚：日本計算工学会論文集，No 20140007，(2014)
(19) 福澤、富山、柴田、越塚:成形加工，26号，(2014)，p114
(20) 重石、福澤、宗正、富山、山井:成形加工シンポジア’14，(2014)，p49
(21) 水口、清水、岩井、井上、石橋、宮内、大下、福田:日本製鋼所技報，58号 (2007)，p12
(22) 岩村、上田、富山：日本製鋼所技報，60号 (2009)，p75
(23) 富山：プラスチックスエージ，vol.61 (6) (2015)，p62
(24) 濱田、田村、串崎、中村：成形加工シンポジア’14 (2014)，p373
(25) 株式会社日立製作所：特許第4379310号 (2009)
(26) 中嶋：産業機械，No.645, 6, (2004)，p66
(27) 高橋：PFT用中空成形機の新技術，産業機械，2014年4月号，p31-33
(28) 日本製鋼所技報，64号，p101-102
(29) プラスチック成形加工学会：第5章　中空成形機　最新端プラスチック成形加工シリーズ　第4巻　先端成形加工技術I，p237-269
(30) 葛良:わかりやすい実践ブロー成形　第3章　ブロー成形機，p19-24

射出成形機の技術発展の歴史と今後の展望

History of Development of Injection Molding Machine Technologies and Future Perspectives

技術士 上園　裕正 *
P.E.Jp Hiromasa Uezono

面林　孝英 *
Takahide Omobayashi

藤井　勝裕 **
Katsuhiro Fujii

博士（工学） 越智　清史 ***
Dr. Kiyoshi Ochi

要　旨

当社の射出成形機事業は、1961年の独）アンケル・ベルク社、1963年の独）クラウス・マッファイ社との技術提携からスタートし半世紀以上が経過した。射出成形機は油圧駆動から高精度安定成形且つ省エネ性に優れた電動駆動に変わり、当社も2004年には全電動射出成形機4世代目となるJ-ADシリーズを市場投入した。その後、超高速射出仕様機であるJ-AD-USMシリーズ機、2010年に子会社化した名機製作所とのコラボ機など、市場ニーズにマッチした特殊機を数多く開発、そして2015年3月に5世代目となるJ-ADSシリーズを市場投入し現在に至る。この10年間はプロセス技術開発にも力を注いだ。当社固有技術であるDSI法をさらに進化させたHP-DSI法や国内で圧倒的シェアを誇る物理発泡成形法のMuCell® 法、メッキなど金属調加飾が射出成形機とインラインで施工できるインラインプラズマコーティングシステムの開発を実施した。射出成形機の基礎技術であるスクリュ・シリンダ技術や制御技術についても、開発・改良を推進し差別化技術として新機種と同時に市場投入をしてきた。今後さらに発展しグローバルトップ5になるためには、お客様に感動を与えるような差別化技術の開発が必須であり、これからも継続して技術開発を推進していく。

Synopsis

Over half of a century has passed since we began our injection molding machine business operations in technical collaboration with the German companies Ankerwerk in 1961 and Krauss Maffei in 1963. Injection molding machines have evolved from being hydraulically-driven to become superior electrically-driven, energy-saving machines that provide precise, stable molding conditions. In 2004, JSW introduced the J-AD series, its 4th generation of all-electrically-driven injection molding machines. Thereafter, JSW continued to develop a number of specialty machines that met market needs, such as the J-AD-USM ultra-high speed injection specification series of machines, and machines in collaboration with subsidiary Meiki Co. in 2010. Now in the present, we have just released the 5th generation J-ADS series in March 2015. Over the past 10 years we have also poured our efforts into the development of process technologies. We advanced our proprietary DSI process technology to create the HP-DSI process, acquired a commanding market share in Japan for the MuCell foaming molding process, and developed an inline plasma coating system that combines plating and other metal finishing processes together with injection molding machine operations. Screw and barrel technology and control technology are the core technologies of injection molding machines, and we have continued to develop, improve, and bring to the market these technologies along with the releases of new machines to stand apart from our competitors. In order to develop into a Global Top 5 company, we must develop differentiated technologies that impress our customers and continue moving the progress of technological development forward.

* : 広島製作所　射出機開発部
Injection Molding Machinery Design Dept., Hiroshima Plant

** : 広島製作所　射出機械部
Injection Molding Machinery Engineering Dept., Hiroshima Plant

*** : 広島製作所　電装技術部
Electrical Engineering Dept., Hiroshima Plant

1. 緒　　言

高精度安定成形且つ省エネを謳い文句に、電動駆動の射出成形機が初めて市場に投入され四半世紀が経過した。その間、基幹部品であるサーボモータの大容量化やボールねじの高負荷対応といった部品レベルの進化は見られたが、射出成形機本体の技術革新は見られず特に国内においてはコモディティ化が進み価格競争が激化した。そのため当社も2004年J-ADシリーズを市場投入した後は、差別化技術確立を目的としたHP-DSIやMuCell®といった当社保有のプロセス技術の開発・改良や、当社オリジナル制御技術の開発に取り組んだ。さらに2008年に業務資本提携、2010年に子会社化した名機製作所とのシナジー効果を出すべく、対向2M機などコラボ機の開発にも取り組んだ。

本稿では、2015年3月に市場投入された電動駆動5世代目となるJ-ADSシリーズの説明に加え、J-ADシリーズが市場投入された2004年以降10年間の技術開発を機種開発・プロセス技術・スクリュ技術・制御技術の4項目に分けて紹介させていただく。

2. 射出成形機の技術発展

当社は1961年に独）アンケル・ベルク社、1963年に独）クラウス・マッファイ社と技術提携し、小型から大型までの射出成形機の開発・製造を行うと共に技術の蓄積を行ってきた。その射出成形機は油圧を駆動源としており、型締装置にトグル機構、射出装置にはインラインスクリュ方式を採用した機械であり、射出成形機業界での確固たる地位を築く礎となった。しかし時代の変化と同時に環境負荷低減が叫ばれる中、日鋼アンケル・ベルクVシリーズ（写真1）を初めとし、N、NA、N-BⅡ、J-S、J-SⅡ、J-E、J-EⅡ、J-EⅢといったシリーズ変遷を辿った油圧式射出成形機も、2012年初頭の竪型射出成形機の出荷を最後に電動式射出成形機にバトンタッチすることになった。

写真1　Vシリーズ

2.1 射出成形機のシリーズ変遷（図1）

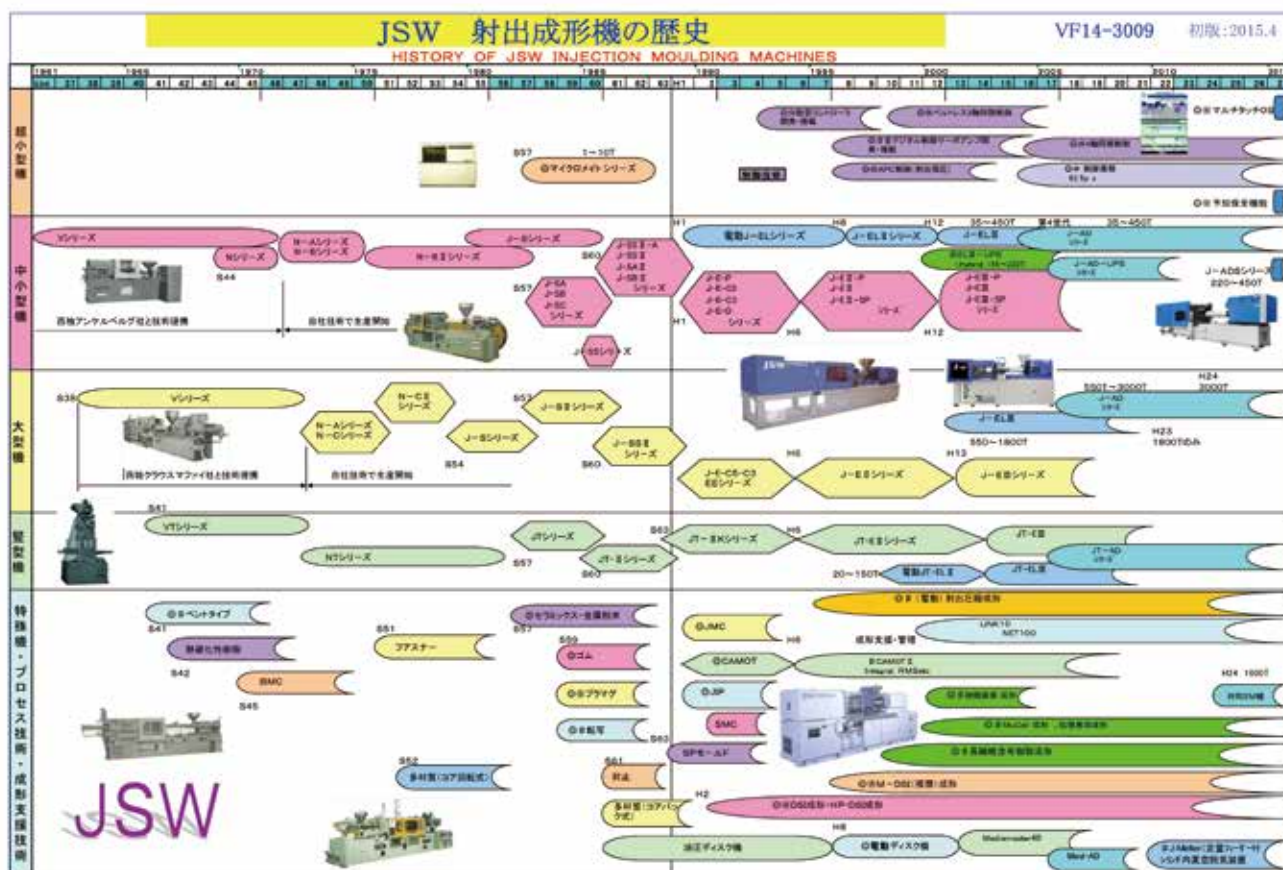



図1　射出成形機のシリーズ変遷

省エネ、作動油レスなど環境性能に優れた電動式射出成形機において、1984年に当社はいち早く開発に着手し4年後の1988年に全電動射出成形機 J-EL シリーズを販売開始した。当時、射出成形機の電動化にはさまざまな技術的課題があったが、改善・改良を繰り返して1995年には J-EL Ⅱシリーズ、2000年には J-EL Ⅲシリーズ、2004年にはロングセラーとなった4世代目の J-AD シリーズを販売開始した。

2.2 J-AD シリーズ

J-AD シリーズは射出成形機業界において稀に見るロングセラーとなったが、その背景には小型から超大型、竪型といった順次発売される多彩なラインナップ、競合他社を凌駕する機械仕様、および市場ニーズにマッチした特殊仕様の射出成形機がタイムリーに追加ラインナップされてきたことにある。

2.2.1 小型 J-AD 機（写真2）

写真2　小型 AD 機

小型 J-AD 機は薄肉精密分野をターゲットとして開発され、他社に対しハイスペックな射出仕様を標準機として採用した。小型 J-AD 機ではそのハイスペックな射出仕様のため従来の制御では十分に性能を発揮することが困難であった。そこで自社にて制御技術や基板開発および製造が出来る強みを生かし、射出成形機として最適な高速サーボ制御回路の開発に成功し、SYSCOM3000 コントローラ（図2）として J-AD シリーズに搭載した。その最大の特徴であるサーボモータをコントロールする制御周期は業界最速級の 62.5μs を実現しており、高速射出成形分野での精密安定成形に大きく寄与している。さらにコントローラの操作部においては15インチのタッチパネルを縦置きに採用することで、同時多画面表示することができ、見やすい、判りやすい、操作しやすいコントローラが実現した。

また、J-AD シリーズでは、更なる精密安定成形を実現すべく JSW 独自の射出制御を標準搭載した。可塑化完了後にスクリュ回転により溶融樹脂の密度を安定化させる IWCS 制御や、射出工程における保圧切換直前のピーク圧力を防止するソフトパック制御、射出工程中の圧力制御でのオーバーシュート、アンダーシュートを抑える APC 制御など、電動射出成形機ならではの多彩な制御を標準搭載し使用可能である。

その後、小型 J-AD 機は現在に至るが、それらの性能は今なお見劣りすることは無くロングセラーの由縁となっている。

図2　SYSCOM3000 コントローラ

2.2.2 中型 J-AD 機

中型 J-AD 機は2006年6月に型締力 350tf の J350AD 機より販売開始し、2007年3月に中型 J-AD 機4機種のシリーズ化が完了した。中型 J-AD シリーズは小型 J-AD 機の思想を踏襲し、高速サーボ制御周期の搭載に代表される成形安定性の向上をベースに、型締装置・ベッドの高剛性化を図り、より安心してご使用いただける機械とした。特に型盤、ベッドにおいては FEM 解析技術により最適設計を行っており、平板の実成形における肉厚バラツキは従来機より約17％改善、高速型開閉時の固定盤の振動は 30% 以上低減できた。

2.2.3 大型・超大型 J-AD 機（写真3）

写真3　超大型 AD 機

大型・超大型 J-AD 機は2009年10月に型締力 850tf まで、2011年1月に型締力 1300tf まで、さらに2012年1月には世界最大の型締力 3000tf までの全電動式射出成形機のシリーズ化が完了した。本機は自動車・ＯＡ機器・家電・雑貨分野などにおける成形品の大型化・薄肉化、そして更なる生産性向上や成形安定性といった市場ニーズを満足すべく「ハイサイクル」と「省エネルギー」「成形安定性」をキーワードとして開発した。

「ハイサイクル」においてはハイサイクル性・省エネ性に優れるトグル式型締構造を採用し、最適なトグルデザインを追及することで型開閉速度の高速化を実現した。またスクリュデザインも進化させ、低温均一可塑化、高混練性、可塑化能力を満足したスクリュを開発し更なるハイサイクル性能を極めている。

「省エネルギー」においては前述の最適なトグルデザインとハイブリット自動車と同様の電源回生システムを採用し、射出や型締などの機械動作によって蓄積されたエネルギーを電気エネルギーとして回生することで消費電力および CO_2 排出量低減に寄与している。

「成形安定性」においては前述の制御周期の向上による射出性能の安定化に加え、4 本のボールネジを 4 軸のサーボモータで駆動させ、それぞれを同期させることができる独自の多軸同期制御技術を開発した。この技術によりハイパワーかつ高精度なサーボシステムが実現し安定成形に寄与している。

2.2.4　竪型 J-AD 機（写真 4）

写真 4　竪型 AD 機

竪型 J-AD 機は 2006 年 11 月より型締力 40tf、70tf ロータリー機を販売開始し、2009 年には全電動竪型射出成形機としては世界最大となる型締力 220tf ロータリー機を発売し、シリーズ開発を完了した。竪型射出成形機はインサート成形を主体とした機械であるため、生産ラインの一部としてインラインに設置されることが多く、成形品のパスラインを低くするため低床化が必要となる。また機械サイズのコンパクト化、生産性向上のため型開閉やテーブル回転速度の高速化が要求され、それらを満足した機械として開発された。

2.2.5　超高速射出仕様機　J-AD-USM 機

インターネットが普及するとともに携帯電話やスマートフォン、小型ゲーム機、ノートパソコンなどのモバイル機器の普及も目覚しいものがあり、技術の進歩により小型化・軽量化に拍車がかかった。それらで使用される導光板やメディアカードなどの部品も薄肉化されるため、高速高圧で樹脂の充填応答の良い射出仕様を有した機械が必要になっていた。

これに対応するため、標準機の機械構造をベースに装置の低慣性化とモータの出力をあげることで、速度 800mm/sec の高速・高応答射出性能を実現させた J-AD-60H-USM 機を 2008 年に完成させた。

60H-USM 機は従来の高速射出速度対応機に対して、射出速度の立ち上がり（加速度）を 2.5 倍に改善しており、最高速度 800mm/sec までの到達時間は、13.5ms となっている。（図 3）その後も改良・改善を進め、現在では最高速度 1000mm/s に到達することが可能となっている。なお射出速度の立ち上がりを改善することでさらなる高速制御が必須であるが、前述の高速サーボ制御技術により安定した射出性能を発揮することが可能となっている。その後ネットブックなどのタブレット端末の大型化に伴い導光板なども大型及び薄肉化が進み、大容量且つ高速高応答の射出性能が必要となった。そのため、J-AD-180H-USM 機を 2010 年に追加発売した。なお J-AD-180H-USM 機は、60H と比べ射出能力確保のためボールネジとサーボモータが 2 軸必要となるが、独自の高速同期制御技術を駆使し開発することが可能となった。

導光板など薄肉製品を成形するための技術として、電動トグル式射出圧縮成形も標準装備した。トグル式は直圧式成形の 10 倍以上の精度で金型位置の制御が可能であることに加え、超高速射出に対応する為、型締用サーボモータの容量アップおよびプーリ比を最適化した高速圧縮仕様を標準装備した。射出中のスクリュ位置と型締力（圧縮力）を連動させることができる独自の【射出連動】機能を付加することでひずみや肉厚ばらつきのない成形品が得られる。

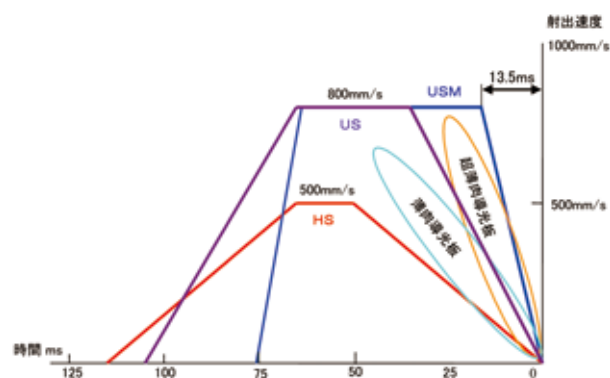



図 3　射出加速性能比較（60H）

2.3　対向２色ハイブリッド式射出成形機
　　（JM1600AD-MR）

2010 年 2 月に㈱名機製作所と協業体制を取ることとなり、名機製作所の特殊直圧型締装置の技術と当社の持つ電動射出装置の技術をコラボレーションした対向 2 色ハイブリット式射出成形機を共同開発し 2012 年 7 月より販売開始した。本機はヘッドランプ、テールランプ成形を専門とする自動車の部品メーカーをターゲットとした機械で、その製品の塗装レス、ラインレスのニーズが高まり、欧米や韓国車にも展開を期待して開発された。

機械の構成としては固定盤と可動盤の間に両面に金型を搭載することができる中間盤を有した機械である。中間盤は回転機構を有しており、固定盤および可動盤側からそれぞれ異なった種類の樹脂を射出することができるものである。中間盤が 180 度反転を繰り返して成形を行うことで、スタックモールド式となりキャビティの総数を 2 倍に出来るため、1 サイクルにて 2 色製品の成形が可能であり、生産性の向上を図ることができる。

2.4　J-ADS シリーズ（写真 5）

写真 5　中型 ADS 機

当社では電動射出成形機 5 世代目となる J-ADS シリーズを開発し、中型 4 機種を 2015 年 3 月より販売開始した。J-ADS シリーズは高剛性、高精度型締装置、新開発コンパクトシリンダおよび新コントローラ SYSCOM5000i を採用した機械であり、お客様の「安心」を追及した機械となっている。

①高剛性、高精度型締装置

従来機から高剛性型締装置の思想を継承することに加え、盤面全体の変形量が均一となるよう改善を重ね、金型パーティング面の面圧のばらつきを従来比で約 55% 改善することに成功した。これにより成形品の肉厚分布の改善や、ガス焼け問題の改善が期待できる。

②新開発のコンパクトシリンダ

射出成形機のシリンダには高圧が作用するため相当の強度が必要となる。今回従来比 1.5 倍の材料強度を持ったシリンダ材料を開発し、シリンダ外径を小さくすることに成功した。このことにより熱伝達効率が向上し連続成形時の消費電力を約 10% 削減できると共に、温調周期の改善も含め樹脂温度の制御性も向上し、安定した成形性能が得られる。

③新コントローラ「SYSCOM5000i」

スマートフォンのような操作感覚や絵文字を多用した直感的に理解可能なインターフェイスを採用するなど、使いやすさの向上を第一に考えて開発した。また、ボールねじや冷却ファンのような消耗品の交換時期を算出し点検時期を通知する「予知・予防保全機能」や、「消費電力の表示」、成形初心者向けの「成形支援機能」など、お客様の生産性を向上させる様々な機能を搭載し、お客様の「安心」を得られるコントローラとなっている。

3.　成形プロセス技術

産業の空洞化が叫ばれて久しい日本国内の製造業だが、昨今の円安の後押しもあり、生産拠点を日本に戻すなど国内回帰の傾向にある。プラスチック射出成形業界も同様で、大量生産・大量消費するような製品を除き、特に付加価値を高める製品は国内で生産している企業も少なくない。これら成形業界の動向に伴い、当社としては、お客様ニーズに応えるための、『ものづくり』の効率化に主眼を置き、新たな成形プロセス技術や複合成形技術の開発に注力・開発をおこなっている。その事例を解説する。

3.1　DSI 成形法（Die Slide Injection）

図 4 に DSI のプロセスを示す。DSI のプロセスは、まず 1 次射出で 1 次成形品（中空品の半割り体）を成形し金型を開く。金型は、射出成形機に設けたダイスライド機構で 1 次成形品同士が向き合う位置に移動する。再度金型を閉じ、1 次成形品を付き合わせた部分に、ハチ巻き状に樹脂を 2 次射出融着し成形品を一体化する。このように、1 次成形直後に温度が下がりきることなく金型内で融着されるため、熱収縮による接合面の寸法変化の心配も無く高精度な成形品を得ることが可能である。

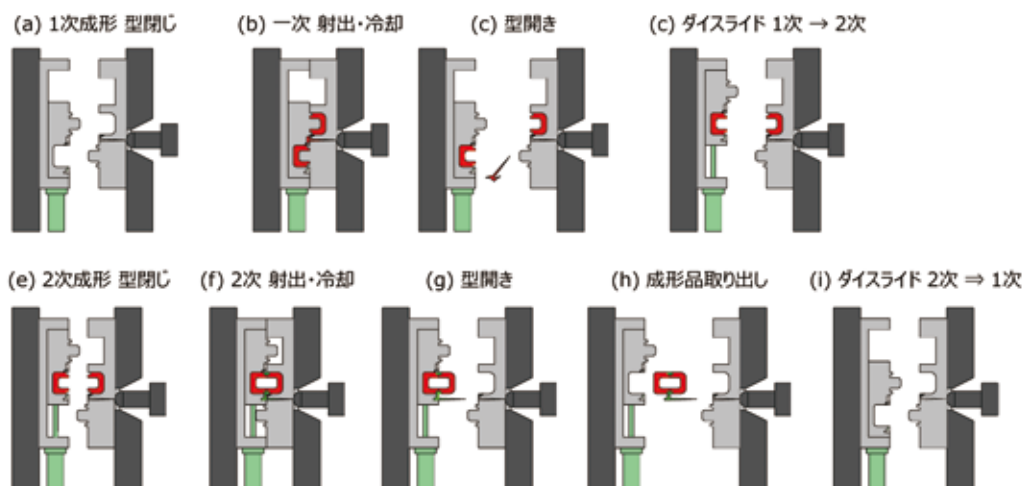



図4　DSI のプロセス

3.2　HP-DSI 成形法（Hot Plate-DSI）

DSI 成形法は中空成形品を製造する画期的な工法である。しかし一体化するときの融着部は中空体の外周部のみであり内部に存在するリブは融着困難である。また、融着性の悪い樹脂は本工法を適用することができない。これら２つの課題を解決できる工法が HP-DSI 成形法である。図５に HP-DSI 成形法のプロセスを示す。HP-DSI のプロセスは、まず１次射出で１次成形品（中空品の半割り体）を成形し金型を開く。金型は、射出成形機に設けたダイスライド機構で１次成形品同士が向き合う位置に移動する。金型のパーティング面が設定された隙間になるまで金型を閉じ、ヒータを挿入し接合面を加熱する。ヒータを抜去後、再度金型を閉じ融着し成形品を一体化する。HP-DSI 成形法の特徴を以下に示す。

①成形直後に金型内で融着一体化するため、外乱影響が少なく融着品質不良の低減が図れる。
②成形金型内で一体化可能なため、工程数が削減できる。
③１次成形品の中間在庫レスが図れる。
④平面以外の３次元形状接合融着が可能である。
⑤中空体内部のリブも融着可能である。

なお HP-DSI 成形法は振動溶着法などと比較し優れた接合強度を持つ工法であるが、製品形状毎に専用ヒータの設計が必要であること、ヒータの最小曲げ半径では表現できないような複雑なリブ形状には対応ができないことなどの課題がある。この課題を解決するのがスイング式ヒータである。写真６にスイング式ヒータの例を示す。ヒータ前後進と偏芯カムをサーボモータで駆動させることによりヒータをスイング動作させる。このヒータのスイング動作により、溶着部を均一に加熱することができる。

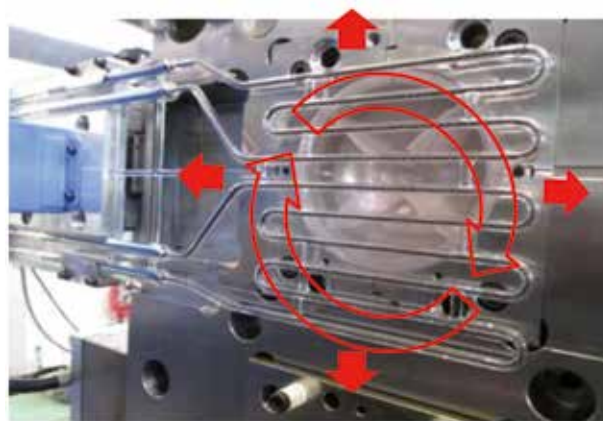



写真６　HP-DSI スイング式ヒータ

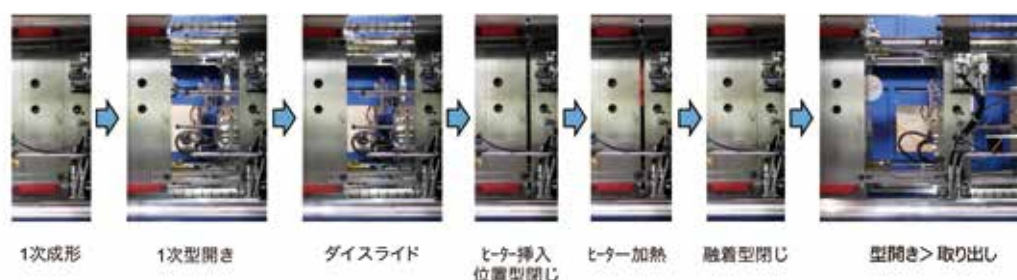



図５　HP-DSI のプロセス

3.3　MuCell®と貼合成形による加飾成形技術

MuCell®射出成形法とは、外径10～200μmの独立気泡を有するプラスチック発泡体が得られる微細発泡成形技術である。この技術は、アゾジカルボンアミド（ADCA）などの化学発泡剤でなく、窒素や二酸化炭素を使用する物理発泡成形技術であり、環境負荷低減やリサイクルの面から注目されている。図6にMuCell®射出成形法のプロセスを示す。

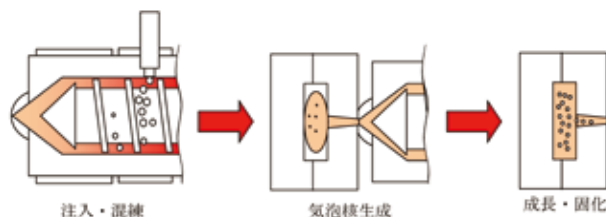



図6　MuCell®射出成形法のプロセス

①シリンダ内の溶融樹脂中に超臨界状態の窒素もしくは二酸化炭素を注入し、溶融樹脂材料と混練する。
②金型内に充填する過程において、溶融樹脂中に溶解している窒素もしくは二酸化炭素が溶解状態を維持できなくなり、気泡核が生成される。
③発生した気泡核が成長し、気化したガスの内圧により金型壁面に樹脂材料を押し付け賦形し冷却固化する。

MuCell®射出成形法は発泡成形であるため、製品の軽量化やひけ・そり改善といった製品面のメリットは化学発泡剤を使用したときと同様期待できる。しかしMuCell®射出成形法の最大の特徴は、発泡剤として超臨界状態の窒素や二酸化炭素を使用することであり、これにより下記に示すメリットが更に期待できる。

①溶融樹脂の見掛け粘度の大幅低下による射出圧力の低減や型締力の低減といった成形プロセス面のメリット
②樹脂材料を侵さず、リサイクルが可能といった低環境負荷
③エンプラ・超エンプラ材料にも使えるといった優れた汎用性

MuCell®射出成形法は発泡成形であるため、成形品の強度低下と表面性状の悪化という発泡成形品特有の課題が存在する。本報で紹介するMuCell®と貼合成形による加飾成形技術は、表面性状悪化といった課題を解決する方法の1つである。写真7は、IPF2014に出展されたMuCell®と貼合成形による加飾成形システムである。システムは、射出成形機本体および金型温調機や取出機といった一般的な周辺機器に加え、MuCell®成形をするためのSCF装置やガスボンベ、フィルムを設置するフィルム設置台から構成されている。今回実施した成形は、厚み約0.4mmのABS樹脂用フィルムを設置台に設置し、金型開き時に取出機にて金型内にインサート後にMuCell®射出成形を実施した。写真8は実際にIPF2014展示機で成形した成形品である。MuCell®射出成形法で成形した成形品は、標準成形品と比較し表面性状が悪いため、人の目に触れるような外装品には適用しにくい。しかしフィルムを貼ることにより成形品の表面性状が改善し、軽量且つ高意匠な外装品が実現する。さらにインサートするフィルムを変更するだけで様々なデザインに対応できるため、多品種小ロットの対応も容易である。

写真7　MuCell®加飾成形システム

写真8　貼合成形による加飾成形品

3.4　MuCell®と拡張成形

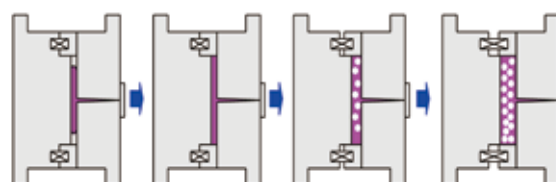
発泡成形の1つである、ショートショット法では、発泡倍率は1.1倍程度の低発泡成形品が限界であり、軽量化率20～30%のユーザ要求を満足できない。一方、拡張成形法では、2～3倍の高発泡体の成形が可能である。図7に拡張動作のプロセスを示す。通常のショートショット法と比較し、各部位のキャビティ内圧は同時減圧されることによりキャビティ内圧の差は少なく、写真9のような均一な発泡体が得られると共に、2～3倍と発泡倍率も大幅に向上させることができる。

①射出：キャビティに発泡材を溶解させた溶融樹脂を金型内に射出する。
②充填：樹脂は完全充填を基本とする。
③拡張：金型を設定量開き(拡張)、内圧を減圧させ発泡圧力により成形品の体積を増加させる。
④多段拡張：一旦停止後、保持し再度拡張する。

図7　拡張成形の動作プロセス

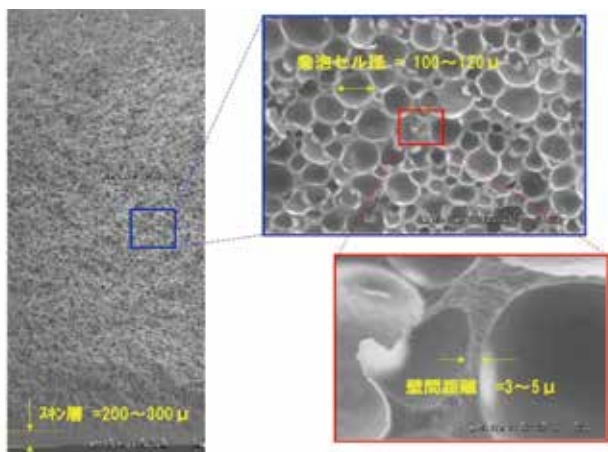
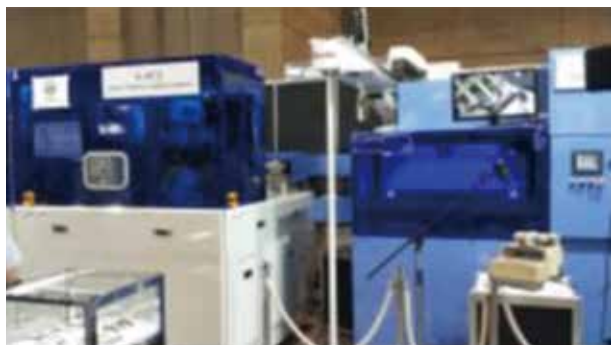



写真 9　拡張成形品のセル観察写真

3.5　インラインプラズマコーティングシステム

世の中のプラスチック製品は、プラスチックの生地のままではなく、表面に塗装、印刷、フィルム転写、メッキなどのいわゆる加飾を施されたものが多い。その多くは成形の後の別工程で行われ、特に金属調加飾については、スパッタリングを初めとする成膜技術などがある。ただし、従来の成膜技術には、主に 3 つの問題点がある。

①チリやホコリ等の付着による不良が高い。
②多くの仕掛品、在庫管理が必要となる。
③チャンバー自体も非常に大きく高価となる。

それらの問題点を解決すべく、成形機と成膜をシステム連動させ更に成膜表面にＵＶ塗料を約 10μm 塗装しハードコーティング処理をインラインで実施することで前記の問題を解消した『サイド・スパッタ・インラインプラズマコーティング・システム』（写真 10、以下 S-iPCS と称す）を開発した。S-iPCS は、射出成形直後の成形品表面に、金属調の“スパッタ膜”と必要に応じて“プラズマ重合膜”又はハードコーティング処理をするもので、射出成形における加飾成形の新たなアプリケーションとして、当社が提案するものである。なお、S-iPCS の特徴を以下に示す。

①成形直後に成膜を実施

従来の成膜装置では、成形後に成形品をストックしておいて、その後メッキ装置や真空装置により、まとめて成膜が行われる。成膜で得られる膜は、数十ナノメートルという非常に薄い膜であるため、外乱に影響するチリやホコリ等の付着が即、不良品へとつながる。一般的に不良率は 10 ～ 15%にもなると言われている。S-iPCS では、成形直後に成膜が可能なためチリやホコリ等の付着を抑えることができ、従来では必要不可欠であった成形品の洗浄工程も削減することが出来る。また、成形直後の保温状態で成膜することで均質な膜を着けることが可能となるため、大幅な不良率の低減につながる。

②安定した真空環境での成膜が可能

従来の大型の成膜装置では $1.0 \times 10^{-4 \sim 6}$Pa 程度の真空圧が必要であったのに対し、S-iPCS では 3 チャンバー方式としており、成膜処理を施すプロセス室を有することで、成膜に必要な真空を保持したまま、プロセス室を外気に触れさせることなく、連続的に安定した成膜を可能としている。最大で 1.0×10^{-3}Pa 程度の真空圧でのスパッタリングが可能である。また、ターゲットは天面と側面の 2 箇所に有し、対象製品の形状に合せ成膜する範囲を大きく広げることが可能となった。これによって成形品の成膜し難い横の部分にも容易に且つ、膜厚均一な成膜が可能となった。

③成膜後のハードコーティング処理

従来のハードコーティング処理はプラズマ重合（HMDSO）の処理を行っていたが、膜厚が薄いため当社が目的とする対象製品の自動車内外装や化粧品用途など加飾表面を素手で触るものに対しては、プラズマ重合処理のみでは耐摩耗性に乏しい。そのため UV 塗料におけるハードコーティング装置（OEM で対応）のシステム共同開発を行い、効率的な UV 塗装装置（写真 11）による耐摩耗性の向上が可能となった。（図 8）一般的に自動車内装品であれば 300 回のテーパーテストが必要であるが、当社評価において自動車外装品に必要な 1,000 回のテストもクリア出来た。

写真 10　S-iPCS 外観

写真 11　ＵＶ塗装装置

基板名	③	⑥	⑪	⑨
試験基板				
ワーク種	PC+PBT	PC+PBT	PC+ABS	PC+ABS
アンダーコート膜 膜厚/μm	17.2	16.2	19.0	11.8
金属種	SUS316			
トップコート膜 膜厚/μm	15.9	14.2	14.2	10.7
アンダー及びトップコート硬化条件	IR 有	IR なし	IR 有	IR なし
剥離	なし	あり	なし	なし
鉛筆硬度	H	F	HB	2B

図８　耐摩耗性評価結果

④スペースの削減

従来の成膜装置では大型チャンバーが基本であり、成形品をストックするスペースが必要であったが、S-iPCSでは成形直後に成膜を実施するため、そのスペースの削減が可能となる。これらをインライン化させることで従来はストックするスペースが必要であったが、S-iPCSでは成膜直後にハードコーティングを実施するため、ここでも大きなスペースの削減が可能となった。

⑤製造コストの削減

従来の成膜装置では、成形品を人手により装置にセットするなど成膜工程に人手が必要であったが、S-iPCSでは成形機と連動させているため、射出成形された成形品は、搬送ロボットにより成形直後に真空チャンバーの中に搬送される。そして、スパッタ膜と必要に応じてプラズマ重合膜を成膜され、搬出ロボットにより真空チャンバーの中より搬出されるため人手も不要となる。また、成形直後に成膜を行うことによる不良率の低下などにより、トータルとして加飾成形品の製造コストを削減することが可能となる。

4.　スクリュ・シリンダの開発

今までスクリュ・シリンダの開発は、新機種開発と同時並行的に実施されてきた。2004年以降も、J-AD大型・超大型全電動射出成形機の開発と並行してスクリュ・シリンダの開発に取り組み新開発スクリュを市場に投入している。しかし最近は、射出成形品の高機能化付与を狙った使用樹脂材料の多様化が加速しており、樹脂別専用スクリュなど新機種開発とリンクせずに進められる開発も少なくない。

本項では、新機種開発と同時並行的に進められた事例としてJ-AD大型機用MⅢ-Dスクリュ、樹脂別専用スクリュ開発の事例としてPC樹脂など光学用成形材料用の不等ピッチスクリュを紹介する。さらにスクリュ摩耗が発生する要因の中で、材質面の改善だけでは解決が困難な溶融過程による要因を対策すべく開発されたCLスクリュ、様々な成形不良現象を解決すべく現象の見える化を実現した可視化シリンダについても紹介する。

4.1　MⅢ-Dスクリュ

一般的にスクリュ・シリンダに要求される性能は多岐にわたるが、MⅢ-D大型機用新スクリュは、旧シリーズで採用していたMⅢスクリュの長所を継承し　①高分散性能　②高可塑化能力　③低温可塑化性能　④色替性能　⑤樹脂適合性能の5項目を代表的な要求特性として性能向上させている。図9にMⅢ-Dスクリュの概略図を示すが、その基本構造は圧縮部および計量部の主フライトのピッチ間に主フライトより若干低い副フライトを設けた構造となっている。

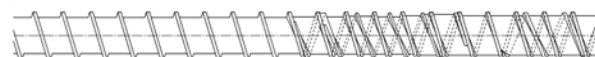



図９　MⅢ-Dスクリュの概略図

4.2　不等ピッチスクリュ

不等ピッチスクリュは、PC樹脂など光学用成形材料での炭化・黄色変色といた成形品不良の発生を抑える目的で開発されたスクリュである。図10に標準スクリュと不等ピッチスクリュの外観の違いを示す。不等ピッチスクリュはフライトピッチを軸方向に従い変化を与え、流路断面積の急激な変化を避け樹脂材料に高いせん断力を与えないよう設計されている。

<標準スクリュ>

<不等ピッチスクリュ>

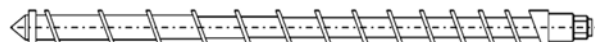



図10　標準スクリュと不等ピッチスクリュの外観の違い

4.3　CLスクリュ（Contact Less Screw）[1)]

CLスクリュは、溶融過程による要因が引き起こすスクリュ摩耗対策として開発されたスクリュである。図11はスラスト軸受けの段付きパッドの模式図であり、CLスクリュはこの潤滑力を発生させる理論をスクリュのフライトに応用したものである。図12は、実際の生産工場にてCLスクリュ適用前・後でスクリュ外径を測定した結果である。CLスクリュ適用前はスクリュフライトが2年間で数mm摩耗していたのに対し、CLスクリュ適用後は同期間の成形でほぼ摩耗ゼロとなり本スクリュの有効性が確認された。

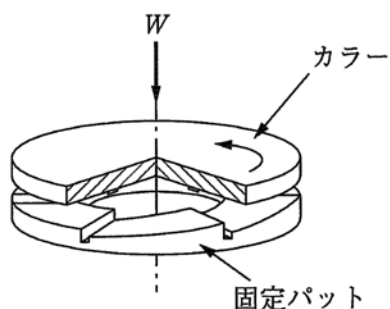



図 11　スラスト軸受の段付パッド形状

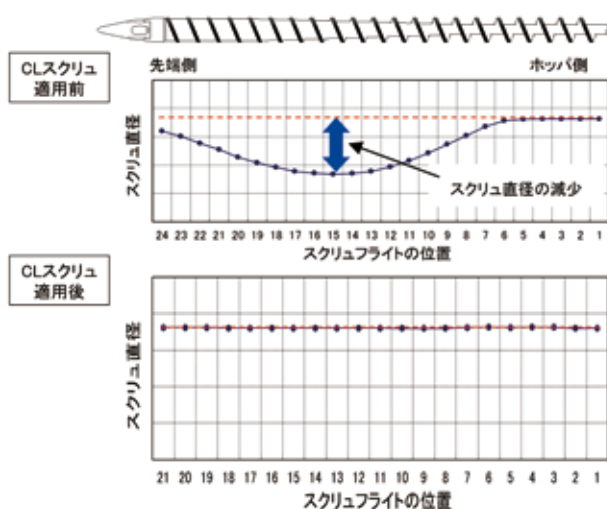



図 12　CL スクリュ適用前・後での外径測定結果
（2 年間、540,000 ショット後）

4.4　可視化シリンダ [2)]

この 10 年は、成形不良現象の見える化（可視化）にも取り組んできた。写真 12 は自社開発した可視化シリンダである。スクリュ直径は 66mm で、シリンダ側面にはサイトグラスを外挿した観察窓を 5 箇所設けており、スクリュ供給部から計量部まで観察することが可能となっている。観察窓を通して撮影した観察画像の一例を図 13 に示す。

なお可視化シリンダの開発により、スクリュ先端に装着されている逆流防止リングの挙動も見える化が可能となった。射出圧力やシリンダ温度など、可視化シリンダの活用においていくつかの制約条件は存在するが、様々な現象解明に向け有効活用が期待されている。

写真 12　可視化シリンダ（66mm）

図 13　可視化シリンダ観察画像
（上：可視化画像、下：赤外線画像）

5.　制御技術

射出成形機は、小型から超大型までの全電動化が進んだことにより、射出、可塑化、型開閉駆動軸に対する、高応答化、ハイサイクル化、高負荷対応能力など、機械駆動性能に対する電気制御技術の役割はますます重要になっている。特に、超大型全電動射出成形機である J2500AD（型締力 24,600kN）以上の機械に対しては、当社独自の大容量サーボシステムの技術が適用されている。射出装置の外観図を図 14 に、制御システムの構成図を図 15 に示す。サーボシステムの構成部品は、中大型と同一の構成部品を採用し、超大型機に必要な推力は、4 軸のサーボモータを同期制御することによって実現されている。多軸のサーボシステムは、高速通信によって接続され、機械全体は、13 軸のサーボシステムによって構成されている。また、大電力を最小限の給電で実現するために、大容量高効率コンバータを標準装備し、電源回生機能によって省エネルギーかつ最小の設備容量で動作するシステムとなっている。

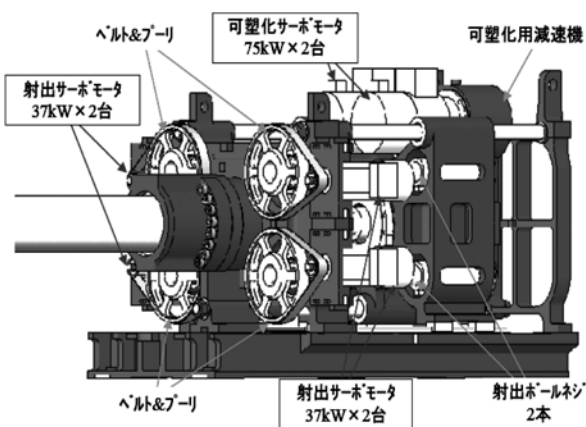



図 14　超大型 4 軸射出装置

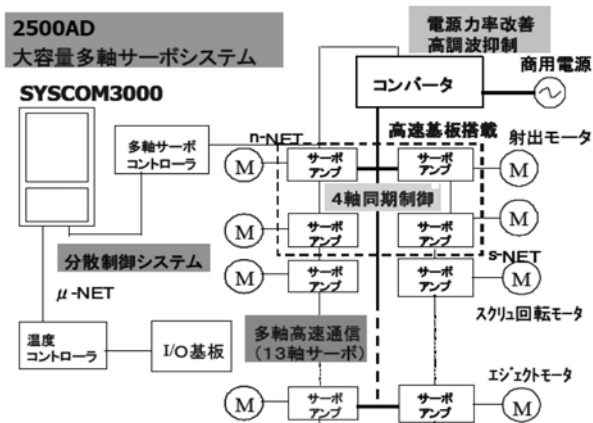



図15　超大型多軸サーボシステム

J-ADシリーズでは当社のコントローラとしてSYSCOM3000を搭載し、2004年の上市以来、その使いやすさに対する好評を頂き、長く実績を築いてきた。そしてさらなる使いやすさの向上を目指し開発したのがSYSCOM5000iであり、2015年発表のJ-ADSシリーズから搭載している（図16）。その特徴は、スマートフォンやタブレット端末などで広く使われているマルチタッチOSを射出成形機として初めて導入し、分かりやすい成形条件の設定と、直感的に機械を操作できるユーザーインターフェイスである。また、射出成形機は、長期間使用頂く製品であることから、寿命予測機能、点検履歴表示機能などの保全機能に対する強化を図っている。また、省エネニーズに対応するため、成形条件に対する消費電力削減支援機能も新たに導入した。

シリンダ温度制御については、昇温開始時の樹脂の焼けや劣化などを防止する同期昇温制御をJ-ADシリーズより搭載しているが、J-ADSシリーズでは、より高精度な温度安定性を確保するために、制御周期を10倍に高速化した新温度制御基板を搭載している。

図16　SYSCOM5000i

6. 結　　言

本稿では、2004年以降10年間の技術開発を機種開発・プロセス技術・スクリュ技術・制御技術の4項目に分けて紹介させていただいた。2015年3月に新型J-ADS機を市場投入したが、その差別化技術はSYSCOM5000iなどソフト技術中心であり、革新的なハード技術の進化がない現状において、この傾向はこれからも続くと考えられる。一方市場では、金属代替などプラスチック成形品の高機能化要求が高まっており、使用樹脂材料はエンプラ・超エンプラ系が増加傾向にある。成形機メーカーには、これら製品に対応した成形プロセス技術及びこれら樹脂材料を想定した長寿命且つ安価なスクリュ・シリンダの開発が要求されており、当社においても本開発は喫緊の課題である。

最後に、コモディティ化が進んだレッドオーシャン市場からの脱却には、お客様に感動を与えるような差別化技術の開発を早期に実現しなければならない。2020年のグローバルトップ5に向け、これからも妥協することなく技術開発を強力に推進していく。

参　考　文　献

(1) 日本製鋼所技報、No.64 (2013)、p.93-94
(2) 安江、荒木、中川、千葉：日本製鋼所技報、No.64 (2013)、p.75-78
(3) 宗盛他、プラスチックスエージ　2009.2、p.75-78

チクソモールディング射出成形機の歩みと将来

Technical Development of Thixomolding Machine and its Future Prospects

前原　明弘
Akihiro Maehara

Sc.D. 斉藤　研
Sc.D. Ken Saito

賀利　清秀
Kiyohide Kari

豊島　敏雄
Toshio Toyoshima

部谷　道雄
Michio Butani

要　旨

マグネシウム合金の射出成形技術であるチクソモールディング法は、米国のダウ・ケミカル社が開発した技術で、金属チップをプラスチックと同様にシリンダ内でスクリュで攪拌・溶解し金型に射出・成形する工法である。当社は1992年、チクソモールディング技術を導入、翌年プロト機を試作し、射出成形機ならびにシステム技術の実用化を進めてきた。今日までに世界中に400台以上の成形機を出荷し、多くのマグネシウム合金部品の量産に用いられている。

近年、地球温暖化現象が明確になり、二酸化炭素排出規制は今後一層厳しくなると予想される。このような背景から自動車軽量化は社会的な急務となっており、その手段としてマグネシウム合金部品の重要性はますます高まってくると予想される。従来マグネシウム合金の成形に用いられてきたダイカスト法に代わって、安全で環境適応性に優れたチクソモールディング法は、この社会的要請に対応できる新たな工法である。

ここでは、当初の開発経緯、この20数年間のチクソモールディング射出成形機の進化、そして今後の技術展望について紹介する。

── Synopsis ──

Thixomolding, the injection molding technology for magnesium alloys, was developed by The Dow Chemical Company (USA). The process is similar to the plastics injection molding. By thixomolding, chip material of magnesium alloy is melt and stirred with screw in the barrel and the molten magnesium alloy is injected into the die to mold the parts. JSW has built not only the thixomolding machine but also total production system for mass production of magnesium alloy parts since 1992. Up to today, more than 400 molding machines have been shipped all over the world and are being used for mass production of various magnesium alloy products.

As the global warming has become evident year by year, CO_2 emissions will be restricted more strictly from now on. Because of this background, the weight reduction of automobiles becomes an urgent social need, and magnesium alloy products are expected to be increasingly important as a means of weight saving. Being superior in terms of safety and environmental protection, Thixomolding will meet the social requirement better than the conventional die-casting technology for producing magnesium alloy parts.

We describe a short history of the development of Thixomolding, and its technical evolutions during this 20 years, as well as the future progress we foresee.

広島製作所　射出機械部　MG設計グループ
MG Design Group, Injection Molding Machinery Engineering Dept., Hiroshima Plant

1. はじめに

実用金属の中で最も軽いマグネシウムは、工業用軽金属材料として使われ始めて以来100年以上を経ている。マグネシウム合金は冷間での塑性加工が困難なこともあって、従来鋳造プロセス（ダイカスト、砂型鋳物、など）で生産されてきた。当社は1992年に鋳造の一種ともいえるチクソモールド法を技術導入して、成形機の開発・製造販売をおこなってきた。これまでの累計販売台数は470台近くに達する。この間、成形機はJLM-MG、-MGⅡ、-MGⅡe機とその時代の市場にマッチするよう改良を加えられてきた。

チクソモールディング法の適用は、業務用ビデオカメラ筐体などから始まり、やがてデジタルカメラ、携帯電話やノートPCなどIT分野への利用へと拡大した。この拡大の背景には、マグネシウムのもつ多くの優れた特性に対する市場の認識があった。軽量、リサイクル性、電磁波シールド性などに優れており、部品の軽量化・薄型・小型化など社会的ニーズに合致したことが要因といえる。

自動車分野でも、省エネ、環境問題などを解決するために車体の軽量化は急務であり、靭性、耐熱性に優れるマグネシウム合金への注目は年々増してきている。

今後のMg原料の需要予測を図1に示すがIT分野および自動車分野とも、軽量化ニーズを背景としてマグネシウム原料の需要は大幅に伸長し、2020年には2013年の2倍以上になると予測されている。

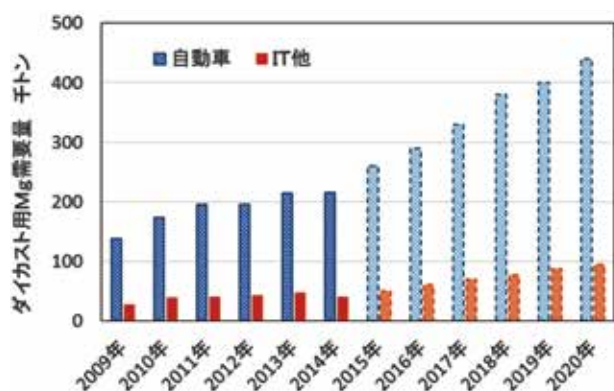



図1　Mg原料の需要予測[3]

本稿では、チクソモールディング技術の導入、成形機開発の経緯、各世代の成形機の特徴、マグネシウム成形を業とする子会社、エムジープレシジョン（MGP）の役割、新しい技術開発などについて紹介する。最後に、今後のチクソモールモールディングの展望について述べる。

2. 開発の経緯

2.1　前史

チクソモールディング技術の開発は、1971年の米国マサチューセッツ工科大学（MIT）における半溶融金属のチクソトロピー現象の発見に端を発する。すなわち、当時MITの学生であったD. Spencer[1]は溶融合金を固液共存状態で攪拌すると、見かけの粘性が低下する現象を見出した。攪拌を中止すると粘性はまたもとの値に戻るという可逆性を持っており、せん断応力により流体の粘性が可逆的に変化する物理現象、チクソトロピー（thixotropy）の一例である。この現象はFlemings[2]らによってレオキャスト法という金属加工プロセスの開発につなげられた。

射出成形技術はプラスチックの成形技術として発達してきたが、これをマグネシウム合金の成形に適用しようという試みが、1970年代中ごろから、米国ダウケミカル社、およびバテル研究所によってなされた。当社はこの技術を1992年に技術導入し、実用機の開発に取り組み、1994年に第一号機となる型締力4410kNのプロト機を完成した。（写真1）この一号機を用いて運転技術の確立、金型技術の習得、などを進めた。

写真1　第一号プロト機（型締力4410kN）

なお、マグネシウム合金の射出成形が市場に要求され、受入れられるようになった背景には以下のような状況がある。

すなわち、化石燃料消費に伴う地球温暖化の弊害が明らかになっており、すべての産業分野で省エネルギーが叫ばれている。その対策として自動車をはじめとする輸送機器の軽量化が有効であることが認識され、従来の鉄鋼材料主体の構造からアルミニウム合金、樹脂など軽量材料への置き換えが模索されている。マグネシウム合金もその有力候補として注目されている。

マグネシウムは、比重が約1.8であり鉄鋼材料の四分の一、アルミニウム合金の三分の二という軽さが最大の特徴である。従来、ダイカストで生産されてきたが、大量の溶融合金を常に保持する必要のあるダイカストは、この溶融

合金の燃焼を防止するため六フッ化硫黄（SF6）という特殊なガスを用いてきた。ところがこのSF6ガスは、大気中に放出されると地球温暖化に寄与する効果が大きく、その影響は二酸化炭素の2万倍以上といわれ、使用が忌避されつつある。

これに対し、射出成形機はその構造上、溶融合金が大気にさらされることは無く、したがってSF6ガスの必要性も無い。また、射出成形機においては合金が溶融しているのはシリンダの中だけであり、その溶解・保持に必要とされる熱エネルギーもダイカストに比べると格段に低い。このような点から、射出成形でマグネシウム合金を成形することは、地球環境保全の観点からも多いに好ましい。労働環境という点でも、ダイカストに比べると安全、快適な職場環境を提供できる。

2.2　プロト機による実用化技術習得

当社は樹脂機械のメーカーであり、プラスチック射出成形機の開発、製造については長年蓄積してきた技術、ノウハウがあったが、同じ射出成形機であるチクソモールディングについては全く異なる要素技術が必要であった。もっとも大きく異なるのは、当然のことであるが、成形する材料の違いである。プラスチックの溶融温度が200～300℃であるのに対し、マグネシウム合金は600℃前後が融点である。この違いに対応するため、成形機のスクリュ、シリンダをはじめとする多くの部品の材料は、高度の耐熱性を持つものとする必要があった。

また、プラスチックとマグネシウム合金では、金型内に充填されたあとの凝固挙動も全く違うため、金型技術も異なる。金型の材質や構造、鋳造方案、離型剤の選択、など多くの技術はダイカスト分野から学ぶことが多かった。

マグネシウム合金を扱う上で避けて通れないことの一つに、安全の問題がある。よく知られているようにマグネシウムは活性な金属で、溶融状態で大気に触れると容易に燃焼し、また微粉末状態で空中にちらばると粉塵爆発を起こすことがある。これらの危険要素を排除して顧客に安心して提供できる機械とするため、プラスチックの射出成形機には無い安全上の対策を盛りこんだ設計とした。

さらに、この実用化技術の開発の途上で学んだことの一つに、射出機による成形から部品としての完成までの工程の長さである。プラスチックの射出成形では、射出成形が終わればそれでプラスチック部品として完成、という場合が少なくない。一方マグネシウム合金の場合は成形後に、バリやランナーなどの切断除去（トリミング）→ネジ部などの機械加工→表面の研磨処理→仕上げ加工、といった後加工工程があり、さらに外観部品では表面処理→塗装、という工程が必須である場合が多い。当社は射出成形機のメーカーという立場を超えて、これらの全工程を理解し、各工程の専門企業とも協力しながら効率の良い製造工程を構築し、顧客に提供してきた。

2.3　実用機としての完成

上記のような経緯を経て、当社は1994年に商業機第一号となる型締力4410kNのJLM450-MGを出荷した。その後も種々改善を加え、また世代交代ともいうべき発展があり、現在三世代目の「MGⅡe」機を市場に提供している。その詳細は第三章に述べるが、実用機として成立するためにはいくつかの技術的改善が必要だった。

その一つは、シリンダの構成である。米国から技術導入した設計では、ニッケル基の耐熱合金で作られたシリンダの内面に、コバルト基耐磨耗合金のスリーブを嵌合した構造となっていた。600～630℃というシリンダ加熱温度に耐える鉄鋼材料が無いため、シリンダ母材はニッケル基合金が採用されていた。しかしニッケル基合金は、溶融マグネシウム合金に容易に侵食、溶損してしまうため、異材質のスリーブを設けることは必須であった。

しかしこのような複雑な構造は製造コストが高く、またニッケル基合金は熱伝導率が鉄鋼より低いなど性能上の問題もあった。そこで鉄鋼材料の研究開発については長年の歴史を持っている当社の室蘭研究所と協力し、630℃までの加熱使用に耐える特殊耐熱鋼を開発し、実機に搭載した。それにより内面保護のためのスリーブは不要となり、熱伝導率も向上した結果、成形機としての運転の安定性も向上した。同時に、スクリュも技術導入時の材料から、当社独自の耐熱鋼に変更した。これらの当社独自材によるスクリュ、シリンダは、その後継続して用いられている。

このような、当社独自の技術を盛り込んだ形で成形機は発展し、市場に普及してきた。以下にその進歩の足跡を具体的に紹介する。

3.　成形機の進歩

上述のように、当社は市場の要求に応えるよう日々成形機を進歩させるよう努めている。これまでの進歩を概観すると以下の三つの世代に区分けされる。

3.1　第一世代　JLM-MGシリーズ（1995年～）

1995年から上市した商業機としての最初のシリーズで、型締力が735kNから8330kNまでの6機種があった。国内では多くのプラスチックモルダーが、同じ射出成形技術ということでチクソモールディング成形に興味を示し、成形事業に参入した。1996年から、ポータブルMDや小物家電製品部品用として中小型機が多数採用された。

海外向けも、ノートPC筐体生産用として台湾企業への大型機納入が相次いだ。また、国内企業がチクソモール

ディング成形体を用いた世界最薄のパソコン製品を発売したことで、業界に強いインパクトを与えた。パソコン業界では筐体4部品全てにマグネシウム合金を採用した「銀パソ」ブームが起こった。

1999年、二つ折携帯電話が発売され、その外装筐体にマグネシウム合金が採用された。液晶画面のカラー化・大型化が進むと、筐体ヒンジ部・窓枠部に強度が求められ、マグネシウム合金部品の採用が一般化し、これに伴ってチクソモールディング機の普及も進んだ。

3.2 第二世代 JLM-MGⅡシリーズ（2002年～）

初代MG機の後継シリーズとしてMGⅡが2002年から上市された。本シリーズでは、以下のような生産性の改善を追求した設計がなされた。

①良品率の改善
②成形安定性の向上
③成形サイクルの短縮
④薄肉製品への挑戦
⑤多数個成形

これを実現するため大容量サーボ弁を採用し、射出速度を従来機の最高3.8m/sから5.0m/sに向上させた。

スクリュは、シリンダ内におけるマグネシウムチップ搬送シミュレーションの結果によりデザインしたフラッドフィード（FF）スクリュを採用した。従来、シリンダへの材料の供給はフィーダによって調整していたが、FFスクリュではこうした供給量の調整は必要がなくなった。成形条件の簡素化のみならず、計量時間の短縮、成形安定性も大幅に改善された。

型締側では、FEM解析結果により型盤の剛性を40%向上した設計とし、型盤中央部のタワミを低減させた。また、世界初となる可変ポンプ合流／非合流切り替え回路を採用し、型開閉動作を高速化した。

2003年、世界中の携帯電話大手各社が中国を拠点に、チクソモールディングによるマグネシウム合金部品の生産を拡大した。

3.3 第三世代 JLM-MGⅡeシリーズ（2006年～）

MGⅡシリーズを、コンパクト化を主眼に改善したMGⅡeシリーズを2006年から上市している。写真2に、JLM650MGⅡe機（型締力 6370kN）の外観を示す。本シリーズの設計で目指したのは以下の諸点である。

①イニシャルコストの引き下げ
②ランニングコストの低減
③成形安定性の向上
④作業性・保守性の改善

写真2 JLM650MGⅡe機の外観

これらは、射出ピストンの軽量化や油圧配管の簡素化、などをはじめとし、射出装置・型締装置それぞれのユニット化による多様なニーズへのフレキシブルな対応を図ることにより達成された。

4. エムジープレシジョン株式会社

4.1 エムジープレシジョン株式会社の設立

当社は、1996年に、広島製作所内に、世界初となる、チクソモールディングによるマグネシウム合金製品の、本格的な量産成形会社『エムジープレシジョン株式会社』（以降、MGP）を設立した。MGP設立の目的は、チクソモールディングによる生産実証に加え、マグネシウム合金部品の成形から塗装にいたるまでの生産プロセス全般を確立し、その生産技術を、チクソモールディングユーザーに広く展開することであった。

4.2 MGPの事業の変遷

MGP設立当初は、エンドユーザーの、マグネシウム合金に対する期待は高いものの、射出成形後の機械加工やバリ処理といった後工程の煩雑さが敬遠され、生産数量の少ない、業務用ビデオカメラの筐体など、限定的な部品を生産していた。その後、当時としては世界最薄となる、肉厚0.65mmのMDウォークマン外装筐体を受注し、生産数量の多い民生用部品の、初めての量産化を実現した。

2000年からは、携帯電話の外装筐体やフレーム（写真3）の試作、量産の受注が続き、携帯電話の普及加速と、機能向上にともなう部品への軽量・薄肉・高剛性という需要が相まって、急激に生産数量を伸ばした。それまでの後工程の煩雑さを解消し、生産効率を上げるために、バレル装置やショットブラスト装置を導入し、量産に適用した。また、バリ除去に使用していたトリミングプレスに加えて、特殊なバリ取り仕上げプレスの開発も行った。生産の主力は280t機であり、2～4個の多数個取りが基本であった。成形金型方案設計の指針や、化成処理や塗装のプロセスは、これらの生産活動を通じて、確立された。

写真３　携帯電話の外装筐体やフレーム

2002年からは、ハイクラスの一眼レフカメラ外装筐体や内部部品（写真４）の試作、量産が始まった。カメラ部品の多くは、携帯電話部品よりも大型で、複雑な形状をしており、寸法精度の要求も厳しかったことから、より一層の生産技術の高度化が求められ、それに応えていった。これらも、生産の主力は280t機であり、１個取りを基本としている。チクソモールディング成形品の品質の高さが好評となり、現在も、多数のカメラ部品と、それらから派生した業務用ビデオカメラ部品の量産を継続している。近年では、外観面のパッド印刷有無や、加工孔の不具合を自動で検出できる、画像検査装置も導入し、生産性と品質の両方の向上を実現した。

写真４　一眼レフカメラ部品

2005年からは、受注機種数こそ少ないものの、ノートパソコンの外装筐体の量産を行った。これらの部品形状は、それまでの携帯電話やカメラの部品とは大きく異なり、成形品の投影面積が大きく、かつ、肉厚が薄いものであった。それまでの主力機である280t機ではなく、650t機で成形しなければならなかったため、それまで持っていなかった、大型薄肉製品の生産技術の開発を進めた。その生産技術により、最近は、12.1インチのタブレットの、肉厚0.45mmの外装筐体の生産を実現している。

2011年には、自動車部品分野（写真５～８）への参入を果たした。主力は650t機であり、それまでの、携帯電話やカメラの部品、ノートパソコン筐体の量産で培った、大型・複雑な部品の生産技術を応用して、安定した量産を継続している。その量産実績と、自動車の軽量化ニーズの高まりにより、新規自動車部品の引き合いと受注、派生モデルのリピート受注は、増加傾向にある。この自動車部品の量産実績は、自動車分野へのマグネシウム合金部品の普及に一役買っている。

また、1000tプロト機を使用した、チクソモールディング成形品としては世界でもっとも重い、製品重量3kgの大型LED照明（写真９）のヒートシンク生産を行い、一定の成果を収めた。

写真５　自動車部品（地デジチューナー）

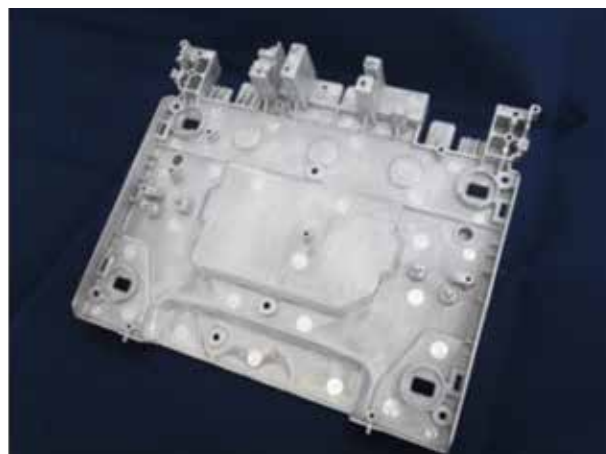



写真６　自動車部品（液晶ディスプレーシャーシー）

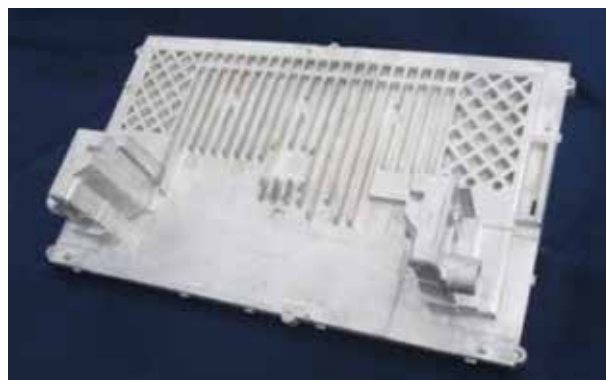



写真７　自動車部品（カーナビ液晶フレーム）

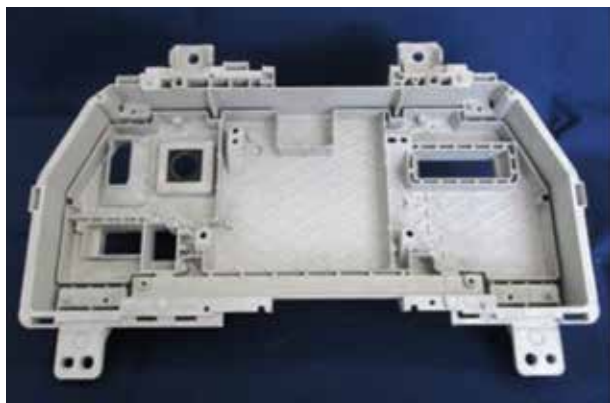



写真8　自動車部品（メーターケース）

写真9　LED 灯ヒートシンク

そして、MGP は、当社と協業し、チクソモールディングによるマグネシウム合金部品の生産効率を一層高めるための、研究開発を推進中である。

5.　2007 年以降の技術開発

前述（第 3 章）のように、1995 年に JLM-MG 機を上市して以来、継続的に新しい成形機および成形プロセスの開発に努めてきた。これらのうち、2007 年までの成果はすでに武谷ら[4]によって記述されているので、ここではそれ以降の活動について述べる。

5.1　大型マグネシウム射出成形機の開発

現行シリーズの MG Ⅱ e 機は、MG Ⅱと同等以上の成形性能を維持したまま、成形機価格をダイカスト機と競合できるレベルにすべく、軽量・コンパクト・部品点数削減を追求、また油圧回路および射出駆動装置も根本的に見直し、スマートフォン、タブレット端末、ノート PC など IT 製品の中小物部品のニーズに応えることができた。

MG Ⅱ e は型締力が 2750kN（JLM280-MG Ⅱ e）, 4410kN（JLM450-MG Ⅱ e）, 6370kN（JLM650-MG Ⅱ e）の 3 機種をシリーズ化している。中でもタブレット端末や 15 インチクラスのノート PC など薄肉筐体を主として生産している機種が、JLM650-MG Ⅱ e（写真2）である。1993 年にチクソモールディング法を技術導入し、1997 年から本格的にマグネシウム合金のチクソモールディング機の販売を開始して以来、累計約 470 台を販売してきたが、本機種はその内の約 100 台を占め、ベストセラーとなっている。

近年、IT 製品の大型化および薄肉・軽量化のニーズは加速しており、17 インチ以上の LCD を持った大型ノート PC の需要が今後増加する傾向にある。表 1 に大型ノート PC 筐体の使用例を示すが、このようなサイズの薄肉成形体の量産にも、JLM650-MG Ⅱ e が用いられている。

また、欧米を中心とした自動車メーカーにおいて、排気ガスのクリーン化と燃費向上を目指した自動車の軽量化、およびカーナビやメータなど車載電子機器筐体、ヘッドランプの LED 化に伴う軽量ヒートシンク部品に Mg 採用の動きも加速しており、大型ノート PC 分野とともに自動車分野の中小物部品の需要が期待されている。成形重量 2000g 以下の製品仕様例を表 2 に示す。現在、これらも JLM650-MG Ⅱ e で生産されているが、この分野のマグネシウム合金部品は大型になる傾向が強い。

これまでの大型量産機は、第 1 世代機の型締力 8340kN（JLM850-MG）が最大である。本機種は国内の自動車メーカーのシートバックフレームの生産に使用されてきたが、MG Ⅱ e シリーズでも同等の大型機が求められている。このような背景で、現在、型締力 8340kN（JLM850-MG Ⅱ e）の機種を開発中であり近日中に上市の予定である。

表 1　大型ノート PC の概略製品仕様

LCD サイズ	15 インチ(現状)	17 インチ	19 インチ
肉厚, mm	0.8≦	1.0≦	1.2≦
外形寸法, mm	230 × 340	260 × 380	290 × 420
製品重量, g	130≦	200≦	290≦
成形重量, g	320≦	500≦	730≦

表 2　中小物部品の製品仕様例（成形重量 2000g 以下）

製品名	液晶メーターフレーム	LED ヒートシンク	ドアインナ
肉厚, mm	1.5	1.5≦	2.0
外形寸法, mm	120 × 600	φ 260	200 × 500
製品重量, g	450	1200	700
成形重量, g	800	1400	1000

5.2　離型剤噴霧技術

チクソモールディングは大きな溶解設備を持たないため、ダイカストと比べると作業環境は良好である。しかし、プラスチック成形の作業環境と比べると決して良好とは言えない。その大きな原因が離型剤の噴霧にある。チクソモールディングではダイカストと同様に離型性向上と金型への焼きつき防止などを目的として、金型の表面に外部から離型剤を毎ショット吹き付ける。これに伴って水蒸気や離型剤ミストが発生し、作業環境をよごすことになる。

また離型剤付着量のばらつきが成形品の品質に大きな影響を及ぼすだけでなく、水分の蒸発に伴い金型表面に発生する大きな熱負荷は、金型寿命を低下させる要因にもなる。当社では、このような離型剤にかかわる課題を解決するために、離型剤少量塗布法の研究、開発を進めている。

離型剤少量塗布法の最大の特徴は離型剤を水で希釈せずに原液で塗布することである。離型剤の少量塗布により、金型外に余分な離型剤が飛散しないため、作業環境の改善に有効であることに加え、離型剤の吹き付け量が極少量であり廃液処理が必要無いこと、エアブローが不要になり成形サイクルが短縮できること、離型剤による金型表面温度の低下が無く、溶融マグネシウム合金の湯流れが向上し、薄肉成形品の寸法精度が向上すること、などのメリットが得られる。図2に離型剤少量塗布法を採用した実施例を示す。この事例では、従来の離型剤噴霧方法と比較すると、金型温度が50℃上昇し、0.4 mm以下の薄肉成形が可能になるだけでなく、成形後の欠陥を補修するためのパテ埋め作業も不要になった。

現在、離型剤を少量だけ噴霧できる能力を持ったスプレーノズルと、離型剤少量供給装置とを使った離型剤少量塗布システムを生産現場に導入して実用テストを実施している。実製品量産における離型剤少量塗布の効果が明らかになりつつある。

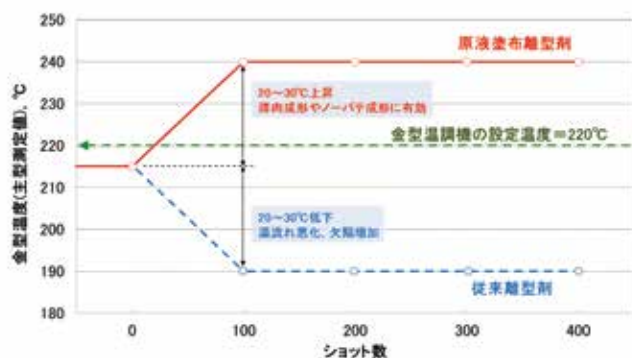



図2　離型剤原液塗布による金型温度維持効果

5.3　材料多様化への挑戦

これまで述べてきた各種成形事例は合金種としてはすべてAZ91D（JIS：MD1D）によるものである。この合金はAlを約9%、Znを約0.7%、Mnを約0.2%程度含んだマグネシウム合金であり、鋳造性、強度、耐食性、などバランスの取れた非常に優秀な合金で、ダイカスト用、射出成形用合金として広く用いられている。マグネシウム合金として開発され、規格化されている合金は他にも多数あるが、実際に使用されているという意味では、ほとんどAZ91Dに限られる、というのが実情である。

射出成形は、ダイカストと競合する技術ではあるが、プロセスとしては全く異なるので、このプロセス独自の材料の成形が可能である。当社もプロセスの特徴に即して成形材料の多様化を目指しており、射出成形用マグネシウム合金材料に関するいくつかの試みをおこなっている。[5, 6, 7] 本稿では、近年手がけつつある二つの例を紹介する。

第一は、Mg-Zn系合金である[7]。近年LED照明が普及し始めるに伴い、ヒートシンクとしてのマグネシウム合金成形体が検討され始めている。前述のように、MGPでも大型LED照明のヒートシンクを生産したが、その材質はAZ91Dであった。ヒートシンクは熱伝導特性が重要であるが、AZ91Dの熱伝導率はアルミニウム合金、たとえばダイカスト合金であるADC12の約半分ほどしかない。これに対しMg-Zn合金は、鋳造後に凝固割れしやすい組成範囲があることが知られているが[8]、ADC12に匹敵する高い熱伝導率の合金である。

凝固割れの発生のメカニズムについては種々説明があるが、低温で鋳込むことがその抑制につながる可能性があり、低温成形が可能な射出成形で成形を試みた。成形に用いた合金は、Mg-5mass%Zn、Mg-10mass%Znの2種類である。成形体は、100 × 200 × 2mmの平板である。種々トライの結果、Mg-10mass%Zn合金はほぼ割れ無しで成形することが可能であった。

図3は、成形したMg-Zn系合金の熱伝導率測定結果である。汎用マグネシウム合金であるAZ91Dの約2倍あり、アルミニウム合金ADC12と同等以上の値を示している。このような合金を用いれば、今まで以上に軽く熱伝導性能の優れたLEDのヒートシンクが実現できるものと期待される。

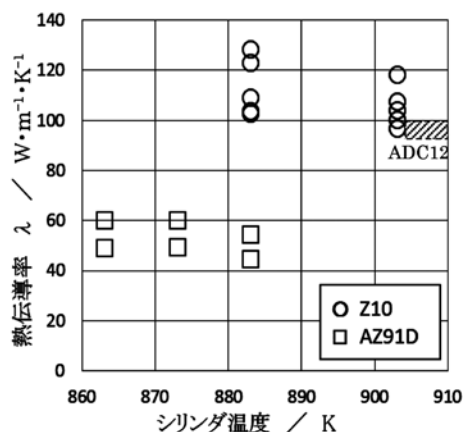



図3　熱伝導率測定結果

第二の例は原料であるマグネシウム合金チップ表面に、カーボンの粉末を付着させることにより、強度の向上や鋳造欠陥の抑制をおこなうものである。

マグネシウム合金の結晶粒微細化に炭素添加が有効であることは以前より知られている[9]が、カーボン自体は溶融マグネシウム合金に濡れにくいので、直接添加するのは困

難であり、特殊な薬剤を用いる必要がある。しかし、射出成形の合金原料チップの表面にカーボン粉末を付着させ、その状態で成形機に供給して成形することにより、カーボン添加の効果が現れる現象を、岡山県工業技術センター、株式会社STU、などを中心とする研究グループが見出した（商品名：UH合金）[10]。

彼らが見出したのは、①結晶粒の微細化、②それに伴う強度の向上、③微細な鋳造欠陥（引け巣）の減少、などである。このような現象の発生メカニズムはまだ必ずしも明確にはなっていないようであるが、カーボンが溶融合金の中に入ることにより、AZ91D中のAlと反応してアルミニウム炭化物を形成し、これが凝固核の核発生サイトとして働くために結晶粒微細化が起こっているものと考えられる。また、チップの表面に付着したカーボンが固体潤滑剤として働くことにより、成形機の中でのチップ同士の摩擦が減ってチップの充填状態が変化する効果もあると考えられている。

図4は、AZ91DとAZ91D-UHで成形体の（厚さ2mmの平板）引張り強度を比較したものである。強度の向上が見て取れる。図5はAM60BとAM60B-UHのEBSD像（Electron Back Scatter Diffraction Patterns）である。カーボンの添加により結晶粒が明らかに微細化している。

図6は、AZ91DとAZ91D-UHで同じ成形体（ノートPC筐体）を成形し、そのボス部における内部欠陥の状態を比較したものである。UH材を用いた成形体のほうが明らかに欠陥は少ない。

このようにわずかのカーボン添加により種々の改善効果が現れている。UH材は、厳密には新たな合金種というよりは既存合金の前処理というほうが適切であるが、射出成形プロセスの特徴を活かしたものであり、今後ひろく実用化されていくことが期待される。

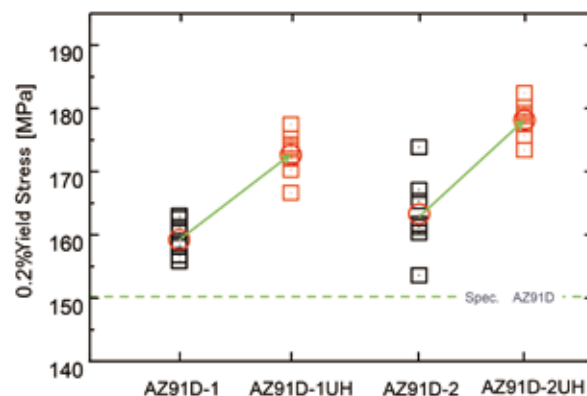



図4　AZ91DとAZ91D-UHの強度比較

図5　AM60BのUH化による結晶粒微細化（EBSD像）

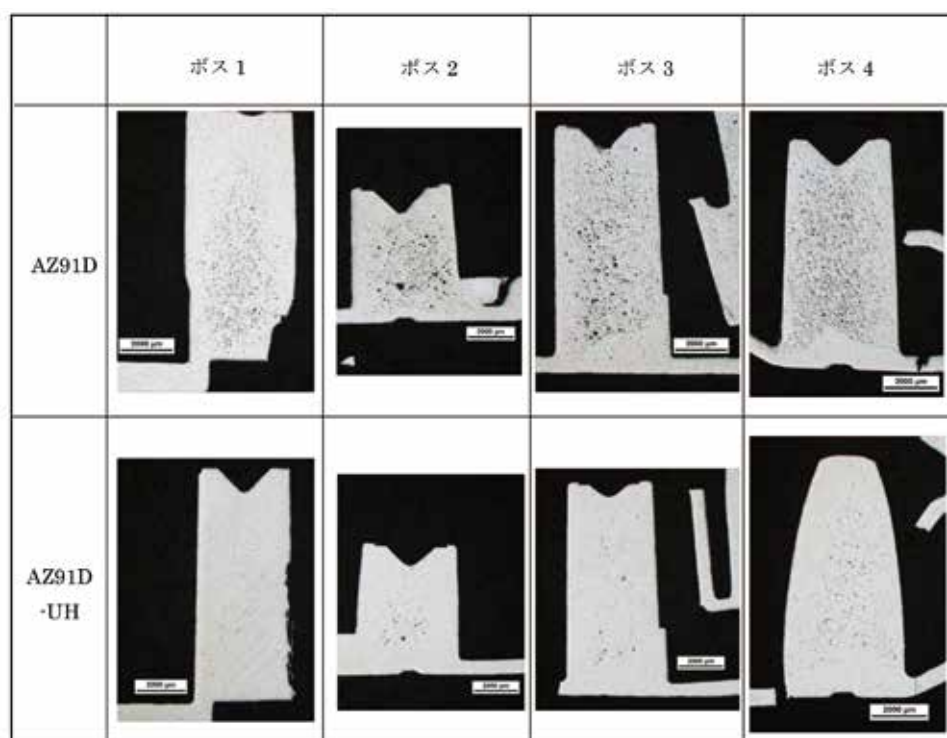



図6　UH合金によるボス部の内部欠陥減少例

6. 今後の展開

以上、20年余りのチクソモールディング技術の進展を概観した。軽量金属材料としてのマグネシウム合金に、各種産業分野で注目が高まっており、それに対応しつつ成形機と成形技術を含む生産システムとして発展を続けてきた。現在、数百台の当社製チクソモールディング機が世界中で量産に使用されており、マグネシウム合金の生産技術として、一定の認知を得ているものと考える。

今後、工業材料としてのマグネシウム合金に対する社会的要請は、地球環境保全のための省エネルギーの観点からますます強くなってくるのは明らかである。また、従来「燃えやすい」として忌避されてきた飛行機や鉄道分野への展開も実用化が視野に入ってきつつある。

当社はこれに応えるため、今後もチクソモールディング機およびシステムとしての成形技術の高度化を目指して活動していく。

チクソモールディング成形品は、従来は家電製品や携帯電子機器への適用が多かったため、主に外観重視の薄肉成形品の生産を念頭に置いて各種技術開発を進めてきた。しかし近年、より肉厚の構造部品へ適用も求められつつあり、その方向への技術革新も目指している。これを実現するためには、成形機のみならず、金型技術や周辺機器を含めたシステムとしての運用技術の改善が重要である。成形機本体についていえば、より大型の製品の成形を可能にすること、消費電力を削減すること、ハード・ソフト両面の改善によってより容易に運転できるようにすること、などがポイントとなろう。

過去20年の蓄積の上に創意・工夫を積み重ね、チクソモールディング技術をさらに発展させて、広い産業分野へのマグネシウム合金部品の供給を促進する所存である。

参考文献

1） Spencer, D.B. et.al: Metallurgical Transactions 3 (1972) 1925

2） Flemings, M.C. : Materials Science and Engineering 25 (1976) 103

3） 日本マグネシウム協会ホームページ http://magnesium.or.jp/property/use/ から再構成

4） 武谷、大下：日本製鋼所技報第58号 (2007) 59

5） 斉藤、前原：軽金属学会第125回秋期大会講演概要集 (2013) 87

6） 斉藤、前原：軽金属学会第127回秋期大会講演概要集 (2014) 15

7） 斉藤、川邊：軽金属学会第128回春期大会講演概要集 (2015) 265

8） Foerster, G.S. : 33rd IMA (1976) 36

9） 日本マグネシウム協会編　マグネシウム技術便覧　カロス出版 (2000) 238

10） 橋本、日野、水戸岡、村上、金谷：軽金属 65 (2015) 118

鉄道製品の歩みと将来展望

History and Future Prospects of Rolling Stock Parts

間　輝之
Teruyuki Aida

西見　裕介
Yusuke Nishimi

上西　道雄
Michio Kaminishi

山口　篤典
Atsunori Yamaguchi

山本　剛
Tsuyoshi Yamamoto

要　　旨

鉄道車両は、世界共通の乗り物で安全で且つ大量に人・物資を輸送できる交通手段である。当社は、長年鉄道車両の重要部品である連結器・緩衝器を製造販売し、現在では国内トップメーカの地位を築き上げてきた。特に緩衝器分野では、ダブル形緩衝器と呼ばれる「車両走行中の前後衝動に対し常に吸収緩和できる緩衝器」を開発し、鉄道車両の乗り心地向上に貢献してきた。このダブル形緩衝器は、今や国内の鉄道会社全ての新造車両に採用され、首都圏を含む大都市圏の電車はほとんどが当社ダブル形緩衝器を採用している。

本紙は、これまでの鉄道車両の発展に伴う連結器・緩衝器の移り変わりと当社の連結器・緩衝器の取り組みを振り返り、今後の当社鉄道製品の展望を以下に記載する。

── Synopsis ──

The rolling stock is common vehicle in the world and is mass transportation means of passengers and goods in safety. For many years, JSW has produced and sold the couplers and the draft gears, which are the important parts of the rolling shock. Now, JSW is the leading manufacture of these products in Japan. Especially for the draft gear, we developed the Double-Construction Rubber Draft gear, which can absorb the impact in anteroposterior direction and improve passengers comfort while vehicle is moving. This double-construction rubber draft gears are now adopted for all newly manufactured trains of the domestic railroad companies. As for the Tokyo metropolitan area, most of all the trains are equipped with these draft gears.

We describe here the history of our products, the rolling stock parts, and future prospects as well.

1. 緒　　言

当社における鉄道製品の関わりは戦前に遡る。近年では連結器，緩衝器の２製品のみとなっているが、日本製鋼所社史には、鋳鍛鋼技術を活かした車軸、輪心、台車や電気機関車の部品をはじめ、連結器・緩衝器以外の油圧ポンプ・モータ、車軸やブレーキディクスが掲載され、多くの製品を扱っていた。

当社が鉄道車両に関わり始めた経緯は明らかとなっていないが、国策の色合いが強い製品を取り扱っていた創設の歴史からも、鉄道製品も同様にスタートしたものと推察できる。

連結器，緩衝器は、図１に示す通り車両の端部２ヶ所に必ず装着され、連結器は「車両を連結，解放する機器」、緩衝器は連結器の尾端部にピン接合により結合された「車両走行中の前後衝動を吸収緩和する機器」であり、いずれも車両にとって重要部品となる。

広島製作所　産機部
Industrial Machinery Dept., Hiroshima Plant

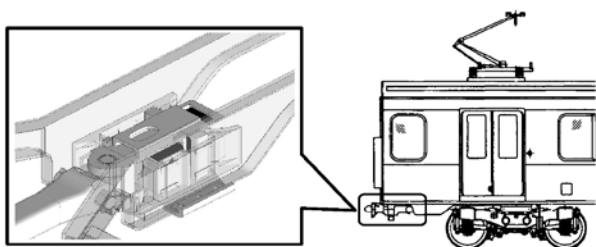



図１　連結器・緩衝器装着部位

連結器は、1950（昭和 25）年の並形（柴田式）自動連結器を初号機として製造開始し、緩衝器についても 1957（昭和 32）年頃から渦巻きばね緩衝器を手がけてきた。こうして当社は、連結器・緩衝器の国内トップメーカとしてお客様のニーズを掴んだ新製品を生み出し、国鉄始め民鉄各社への幅広い採用を軸に国内シェアを確保してきた。

本紙では、国内の鉄道開業からこれまでの連結器・緩衝器の変遷と、当社での取り組みをまとめるとともに、今後の鉄道製品の展望について解説する。

2.　連結器・緩衝器の変遷と当社の取り組み

2.1　連結器の歴史

駅ホームから見る車両間の連結器は、誰もが一度は目にしたことがあるものと思うが、昔の日本の連結器は、現在とは全く異なる形状の機器であった。1872（明治 5）年の新橋―横浜間の国内鉄道開業当初は、ねじ式連結器が採用されていた。

写真１　ねじ式連結器と解放作業風景
（出典 :Wikipedia「連結器」から引用）

ねじ式連結器は、写真１の上段に示すように、中央に引張力を伝えるねじ機構付きのリンクと、左右に圧縮力を受ける緩衝器で構成されている。

車両を接続する際には、作業者が車端に入り、フックにねじが付いた引張棒を車両同士で引っ掛け、更にねじを締め付けることで、両サイドの緩衝器を突っ張らせて車両を連結する（写真１下段）。この作業は非常に大きな危険を伴い、当時は事故が絶え間なく起こっていた。また、ねじ式連結器は、連結や解放作業を人力に頼っていたために、手で持てる程度のものしか取り付けることができず、大型化が困難であり、牽引力にも限界があった。

当時の日本の鉄道はイギリスからの技術導入であったため、ねじ式連結器が一般的であったが、一方でアメリカ合衆国では自動連結器が採用されていた。日本は連結解放作業の安全性や輸送力増加への対応から、自動連結器の採用に向けた調査 , 研究を行い、1925（大正 14）年にこれまでのねじ式連結器から、自動連結器に国内一斉交換に踏み切った。こうした歴史が、その後の日本の鉄道発展に繋がることとなる。

(1)　自動連結器

当社は、1950（昭和 25）年にアメリカ合衆国で採用されていた自動連結器の改良型である並形自動連結器（以下、自動連結器と称す）の製造販売により、連結器分野へ新規参入した。この自動連結器は、1968（昭和 43）年に強度向上を目的として新たに開発した鋳鋼を使用した強化形に変遷するものの、現在でも形状は変わることなく、写真２に示す自動連結器が機関車や貨車を中心に使用されている。

自動連結器の特長は、相互に連結でき、しかも連結面に隙間を生じることで、曲線、勾配においても無理なく通過できる形状となっていることである（図 2）。この隙間は、長大編成を一度に引き出せないことから、機関車からの引張力を分散させるためであり、また上下左右への首振りを可能にするために重要な要素である。一方、連なった編成車両においては、牽引時の引張・圧縮力の作用時には隙間が弊害となり、大きな衝撃力が生じる要因となる。

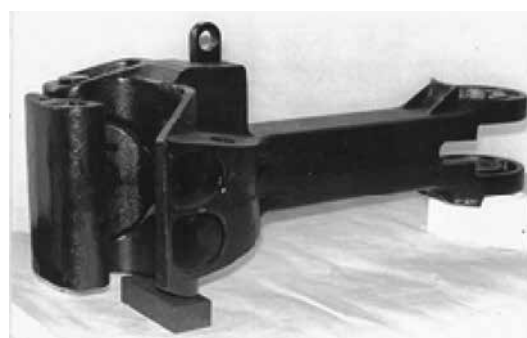



写真２　自動連結器（ピン付）

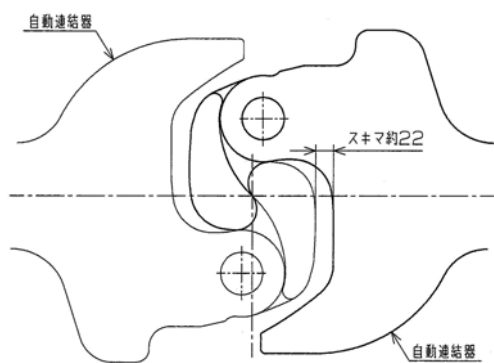



図2　自動連結器の連結形状（連結面に隙間）

(2) 密着式自動連結器

こうした自動連結器の欠点を補うべく、乗客輸送を目的とした密着式自動連結器を当社が1958（昭和33）年に開発した。

このシリーズはNCA形，NCB形と称し、大型から小型機種までがラインナップされ、客車用と気動車用と車両用途に応じて使い分けられた。（写真3）

密着式自動連結器は、図3に示すような連結面の輪郭とすることで、自動連結器と異なり常に連結面に隙間を生じさせない密着性を追求した構造となっている。図4に示すように、錠、ナックル、傾斜板と言う部品で構成され、錠はナックルと傾斜板の間に嵌り込み、常に傾斜板の傾斜面に沿って下降することにより、施錠機構を成している。よって、それぞれが摩耗したとしても、錠は滑り落ちながら常に隙間を生じさせないよう補正されるものであり、乗り心地を重視された旅客車（寝台客車、電車、気動車）用として採用されるに至った。

写真3　NCA5，NCB2形密着連結器

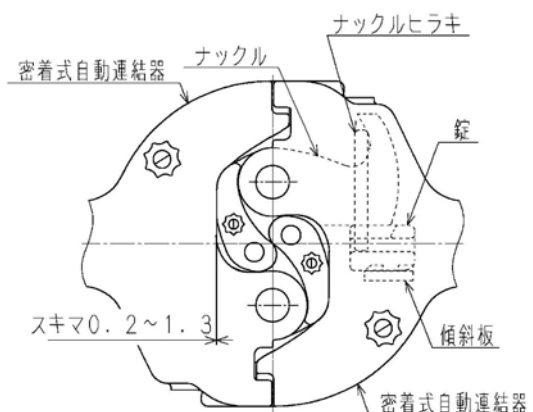



図3　密着式自動連結器の連結形状

図4　密着式自動連結器の機構

しかし近年、客車（寝台客車）の廃止や気動車用連結器の密着連結器化が進むことで需要が減少傾向にあり、自動連結器の欠点を補って開発された密着式自動連結器は、次に紹介する密着連結器へと移りつつある。

(3) 密着連結器

密着連結器は、密着式自動連結器と同様に連結面の密着性を保持したタイプであり、当社は1975（昭和50）年から製造・販売を開始した。連結，解放の要求がある電車用連結器には、ほぼ全数密着連結器が採用されている。

密着連結器は、これまで紹介した自動連結器や密着式自動連結器のナックル式とは異なった連結機構を持ち、図5に示すような半円状の連結錠が互いに相手連結器の錠室へ廻り込んで連結する廻り子式となっている。連結は、相互の連結器を押し込むことで自動的に行われ、解放は連結錠を手で反時計方向へ回転し相手連結器の錠掛カギへ掛けた後に車両を引き離して行われる。

また、密着連結器は電気連結器と結合して使用することも可能となる。さらに、連結錠にエアーシリンダを設けることで、車両の切り離し作業を運転台から操作する機能を追加することもできる。当社では、2011（平成23）年に写真4に示す自動解放装置付密着連結器の製造販売を開始した。

これまで記述した(1)～(3)の3種の連結器は、いずれも車両間の連結，解放を要する部位に用いられるが、車両のメンテナンス以外で切り離しする必要がなければ、自動連結器や密着連結器を用いる必要はない。メンテナンスの削減や連結器の低価格化に沿った要望から、解放装置のない固定連結器も開発された。

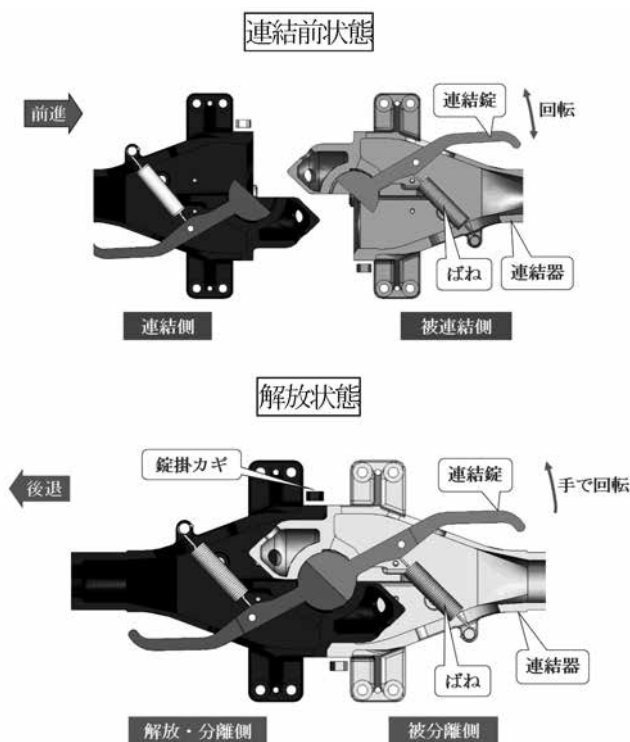



図5 密着連結器の連結形状及び機構

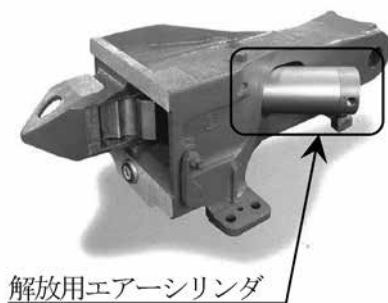



写真4 密着連結器（自動解放装置付）

（4）NPA，NPB形固定連結器

1960（昭和35）年に民鉄電車の中間用連結器としてNPA形，NPB形シリーズを開発した。

NPA，NPB形固定連結器（写真5）は、図6に示すように連結器体、締付金とボルト類のシンプルな部品構成であり、連結器体同士を締付金により固定する。連結器体と締付金の接触面は角度が設けられており、ボルトを締め付けることでこの傾斜面がくさびの役割を果たし連結器が固定される。この方式の固定連結器は、走行中の自連力を締付金で受けるため、４本のボルトには牽引力がかからない特長を持っている。

写真5 NPB形固定連結器

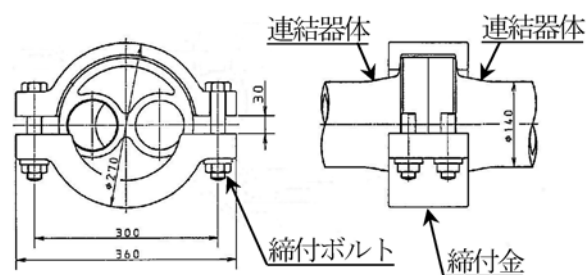



図6 NPA, NPB形固定連結器の接続部詳細

（5）半永久形連結器

一方、国鉄は、1979（昭和54）年にボルト締結形の半永久形連結器（写真5）を採用した。この半永久形連結器は、写真6に示すように先のNPA，NPB形固定連結器とは違い、４本のボルトで直接２つの連結器体を繋ぎ合わせ、ボルトで牽引力を受ける構造となっている。この半永久形連結器を国鉄が採用することで首都圏電車の固定編成化が進められ、当社は国鉄から製造権を得て、現在では約4,000組の半永久形連結器の納入実績を持つ。

写真6 半永久形連結器

（6）棒状連結器

固定連結器の中でも最もシンプルな連結器が、一本の棒状連結器（写真7）である。半永久形連結器よりも更にコストダウンした連結器で、数は少ないがJRの一部の車両で採用されている。

写真7 棒状連結器

（7）小型密着連結器（緩衝器内蔵）

1987（昭和62）年に、モノレールや新都市交通用として連結器胴部にゴム緩衝器を内蔵した連結器を開発した。この連結器は、車体側ブラケットにピンで取り付けるシンプルな構造で、連結器と緩衝器が一体化した連結装置である。

近年、車両メーカの海外進出に合わせた海外向けの引合いが増え始め、当社としても海外向連結装置の調査に取り組み始め、2000（平成12）年には新交通用としてシンガポールに納入した。本連結装置には、海外仕様の要求により、車体取付ブラケットにせん断ボルトを用いることで一定荷重の負荷に対し破断して連結装置が外れる新機能を持たせている。

写真8　小型密着連結器

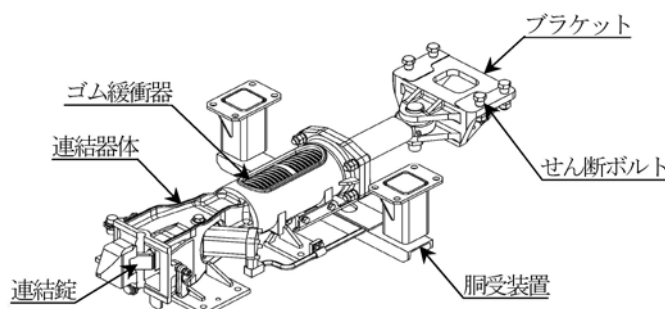



図7　小型密着結器の概要

(8)　衝撃吸収形連結器（非常用緩衝器内蔵）

1993（平成5）年、海外と同様、国内においても電車が踏み切り内の障害物等に衝突した際の衝突安全性が問われ始め、衝撃を吸収緩和できるよう連結器内部に非常用緩衝器を組み込んだ連結器を開発した。国内では、JR東日本E217系電車に輸入品の非常用緩衝器（粘性緩衝器）を採用したのが初となる。その後、上記連結器の軽量化や国産化のJR東日本からの要求により、金属塑性を応用した衝撃吸収形連結器（写真9）を開発し、現在ではJR東日本を始め1,000組を超える採用実績を持つ。

写真9　衝撃吸収形半永久連結器

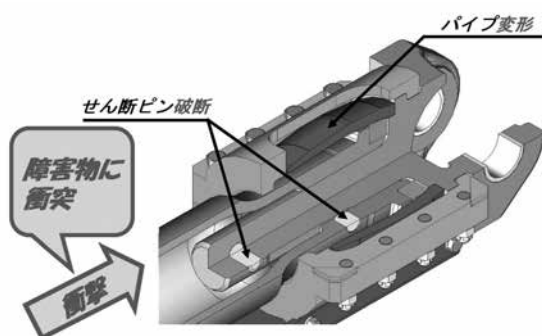



図8　衝撃吸収形半永久連結器の緩衝器部構造

2.2　緩衝器の歴史

連結器と異なり、緩衝器は駅ホームからその姿，形を見ることができない。ねじ式連結器が使用されていた時代は、サイドバッファー（いわゆる緩衝器の要素を持ったもの）が車両の両端に装着されていたが、自動連結器に交換された以降は、連結器と共に車端床下の伴板守と呼ばれるガイド部へ装着する方式が採用された。

当社の緩衝器の製造は、1957（昭和32）年に金属ばねを使用した渦巻きばね緩衝器（写真10）が始まりで、民鉄及び国鉄の客車・電車に採用された。

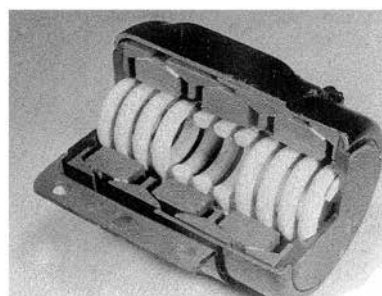



写真10　渦巻きばね緩衝器

(1)　シングル形緩衝器

国内の鉄道では、輸送量の増加、編成の長大化ならびに高速化が図られるに従い、渦巻きばね緩衝器での緩衝容量の不足、更にはメンテナンス性の改善が考慮され始め、金属ばねに変わる緩衝材の見直しが行われた。そこで当社では、国産形のゴム緩衝器の開発に着手。1965（昭和40）年に角型ゴムブロックのゴム緩衝器が国鉄に採用されたことで、電車、機関車、気動車や貨車用と幅広く使用されることとなった。この緩衝器は、図9に示すように、前後に壁のある緩衝器枠に1組のゴム緩衝器を圧縮した状態（この時の圧縮状態を初圧という）で、伴板に挟まれて緩衝器枠へ組み込まれており、車体へ取り付け易いよう緩衝器枠の寸法は車体取付寸法（伴板守）よりわずかに短くしてある。いわゆるシングル形と呼ばれる緩衝器である。

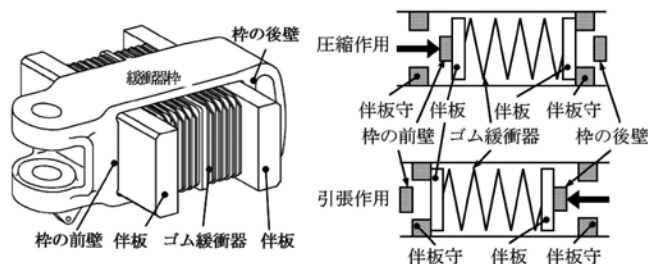



図9　シングル形緩衝器外観と構造

このシングル形緩衝器は、ゴム緩衝器に初圧を与えて組み込まれるために、通常走行時の前後衝動をほとんど吸収・緩和できず、初圧以上の衝撃が生じて始めて作用する。

そのため、昭和50年代の都市圏の通勤客増加による大量輸送時代への突入を受けて、乗客からも乗り心地を求める声が増加し、1978（昭和53）年には、電車用としてゴムパッドのゴム形状を変更し初圧を低くして改良されたゴム緩衝器（RD16形緩衝器）を、更に1987（昭和62）年には新幹線電車向けの低初圧形緩衝器（RD210形緩衝器）を開発した。これらの緩衝器は、現在でも使用されている。

(2) ダブル形緩衝器

一方、乗り心地改善のための構造的な見直しも行われ、1980（昭和55）年には、寝台客車にて衝撃が大きくて眠れないという苦情を解消すべく、ダブル形緩衝器（RD011形緩衝器）を開発した。

図10　ダブル形緩衝器外観と構造

図11　シングル置換え用ダブル形緩衝器外観

ダブル形緩衝器は、図10に示すように2組のゴム緩衝器を前後に壁がない緩衝器枠の中央の仕切りの前後にそれぞれ組み込み、その前後に伴板を取り付けたもので、緩衝器と伴板は緩衝器枠に対しフリーな状態となっている。また、シングル形緩衝器が装着された車両用にも、置換え形用ダブル緩衝器（図11）を考案した。

この構造により、シングル形での初圧以下の衝撃を吸収できないという問題を解決した。ダブル形の初号機である寝台客車用RD011形緩衝器に始まり、新幹線電車、在来線電車と幅広く採用され、2015年3月までに約58,000組の納入実績を持ち、国内緩衝器市場の約7割を確保するに至った。ダブル形緩衝器が国鉄時代に新造車両用として採用されことで、その後のJR各社にも高い評価を頂いたことが当社緩衝器の普及につながった大きな理由である。

(3) 粘性・ゴム併用形緩衝器

2006（平成18）年より、旅客車のみならず、貨物輸送の荷崩れ防止対策として、公益財団法人 鉄道総合技術研究所と共同で新型緩衝器の開発に取り組み始めた。

貨物輸送に用いられる従来のコンテナ貨車の緩衝器には、シングル形のRD19形緩衝器が採用されているが、初圧が高く、緩衝容量も約23kJと他機種に比べ高い。よって、乗り心地（荷崩れ防止）向上を図るためダブル形構造とし、一方で吸収エネルギー不足分を補うべく、粘性緩衝器を追加した新規構造の緩衝器（写真11）を検討した。

写真11　粘性・ゴム併用形緩衝器

図12　粘性・ゴム併用緩衝器構造

本開発品は、NRWS100形と呼ばれ、粘性緩衝器の速度依存性の特性を活かした機能を持つ。衝撃速度が遅い場合はダブル形特性で吸収緩和し、衝撃速度が速い場合はダブル形特性と粘性緩衝器の両特性にて吸収緩和することで、現RD19形緩衝器と同等レベルの吸収エネルギーを確保した。

開発にあたっては、粘性緩衝器の速度依存性の設計検証が重要であり、これまでは外部機関の試験設備で試験を行っていたが、当社試験設備の200t疲労試験機（加振速度 Max100mm/s）を活用し、車両装着状態を想定した組立状態での試験が可能となった。本試験機を有効活用することで、今後の装置開発の推進に対しても大きく寄与するものと期待している。

写真12　当社設備の疲労試験機外観
（左写真 最大 100kN、右写真最大 2,000kN）

このNRWS100形新型緩衝器は、営業線にて現車試験を実施したところ、前後加速度を現RD19形緩衝器に対し抑制することができ、荷崩れ防止に大いに期待できる試験結果を得た。営業線での耐久試験を経て、正式採用、製品化に向けて活動中である。

3.　将来の展望

当社は、約60年間にわたり、国内中心のお客様要求に応えた連結器・緩衝器の開発、市場投入を行ってきた。しかし、国内の人口が減少傾向にあり、鉄道市場の低迷も懸念される中、受注・売上の拡大は当社にとって大きな課題である。

そこで、連結器・緩衝器の将来展望について、前述した経緯を踏まえ下記に記載する。

(1) 保守サービスの充実とメンテナンス事業

これまで、当社における鉄道事業としては、新しいものを作り、良い製品を納入することで顧客満足を図ってきた。しかしこれからは、納入後の製品を長期に亘って品質が安定した状態でご使用して頂くための製品寿命の予測、またそのためのメンテナンス情報の提供が求められる。

そこで、お客様から提供頂いたゴム緩衝器経年品の劣化状態を調査すると共に、製品寿命を予測した適切な交換時期に関するアナウンス活動、更には、並行して寿命を延ばす改良も行い、一定の成果を得た。

補修に関しても、特に連結器は、経年と共に摺動部が摩耗するため、溶接盛金ならびに手入れ作業により、基準を満たすような修繕が必要となる。補修は各鉄道会社の整備工場で実施されているのが現状であるが、将来は、お客様からメーカ依存型へシフトすることが予想される。当社で行える体制づくりについても検討していきたい。

(2) 国内車両メーカの海外案件対応

海外案件への対応も今後の課題となる。国内市場における新造車両生産数量の頭打ちにより、連結器・緩衝器の生産台数についても伸長が望めないことが予想されるため、市場の拡大が急務である。

海外市場への参入に対して数年前より検討を始め、数社の引合から海外仕様の連結器・緩衝器の調査を実施した。海外向け連結器・緩衝器は、国内向けの設計思想とは大きく異なり、緩衝容量が数十倍、電気連結器や周辺機器がひとつのパッケージ化された装置としての要求仕様となっている。また、引合い案件の中には第三者認証機関の認証取得要件もあるため、欧州の試験場へ試作器を持ち込んでの試験も実施し、認証取得することができた。

これらの活動の成果から、2014（平成26）年、国内実績品をベースとした海外仕様の連結装置（電気連結器含む）を初受注した。

今後は、海外仕様の連結器・緩衝器の実績をつけ、国内車両メーカの引合案件に対応できる準備を整えていく所存である。

4.　おわりに

冒頭で、当社の鉄道製品は、現在、連結器・緩衝器の2製品のみと悲観的な記述をしたが、海外を視野に入れるとまだまだ開拓の余地が十分ある。今後も製販一体となった活動を展開することで、さらなる事業拡大につなげることができると考えている。

参　考　文　献

(1) 中栄周三（元鉄道技術研究所）
　　著書「密着連結器の発展史」
(2) 杉山幸雄（国鉄車両設計事務所）
　　著書「連結 自動連結器（上，中，下）」
(3) 窪田国保，西村脩二 日本製鋼所技報 No.1（1959）
(4) 森英雄，松本清，管野信夫 日本製鋼所技報 No.2（1959）
(5) 鈴木惣一，梅中武之 日本製鋼所技報 No.4（1960）
(6) 鈴木惣一，梅中武之 日本製鋼所技報 No.6（1961）

流動解析を応用した単軸スクリュ可塑化解析技術の研究

A Research of a Single Screw Plasticating Using a Flow Analysis

中川　一馬
Kazuma Nakagawa

荒木　克之
Katsuyuki Araki

安江　昭
Akira Yasue

要　　旨

単軸スクリュについて、射出成形機の可塑化能力を推測するツールとして可塑化解析を開発している。従来の可塑化解析では、可塑化能力を決定した後、樹脂の溶融量や固相率を計算していた。この手法ではポリプロピレンのように溶融しにくい樹脂において可塑化能力の計算値が実験値と合わないことがあった。そこで、本研究では樹脂にシリンダから与えた熱量やせん断エネルギーから樹脂の溶融量や固相率を求め、生成された溶融樹脂に対して流動解析を行って可塑化能力を求める新しい可塑化解析手法を検討した。この新しい可塑化解析手法では、樹脂の種類によらず可塑化能力の計算結果が実験結果と良い一致をすることが確認できた。

―― Synopsis ――

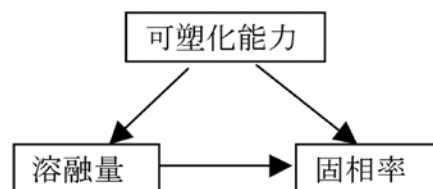
We have been developing a simulation on single screw plasticating for the estimation of plasticating capacity of an injection molding machine. In the previous plasticating simulations, the plasticating capacity was determined first, and then the amount of molten resin and the solid bed ratio were calculated. However, for resins with high enthalpy of melting like polypropylene, the calculated plasticating capacity did not agree with the experimental result. In this research, a new approach is examined, in which the amount of molten resin and the solid bed ratio are calculated first by the heat flux and shear energy applied to the resin, then the plasticating capacity is calculated using a flow analysis for the molten resin. This new simulation method is found to provide calculated plasticating capacity values in sufficient agreement with those experimentally obtained regardless of the type of resins.

1. 緒　　言

単軸可塑化スクリュの可塑化計算は、射出成形機の可塑化能力の推測、スクリュ設計や溶融可塑化現象の物理的考察を実施するにあたり、その一助となるものと考えられる。ここで、樹脂をスクリュシリンダで可塑化する工程の樹脂の輸送、溶融などの要素を計算することを可塑化解析と呼ぶこととする。

図１に示すように、従来法ではスクリュ形状、スクリュ回転数と樹脂粘度から可塑化能力を決定した後、樹脂の溶融量や固相率を求めていた。このとき、例えばポリプロピレンのように溶融しにくい樹脂において、可塑化能力の計算値が実験と合わないことがあった。

図１　従来法の計算順序

広島研究所
Hiroshima Research Laboratory

本研究では、シリンダから樹脂に与えた熱量やせん断エネルギーから樹脂の溶融量および固相率を求めた。そこで計算された溶融樹脂を、固相の影響も加味したスクリュ溝内の流路を流れる流体としてPatankar[1]の流動解析を適用し、可塑化能力（流量）を求める流動解析[2) 3)]を用いた可塑化解析手法を検討した（図2）。本研究ではその具体的計算手法と成果について述べる。

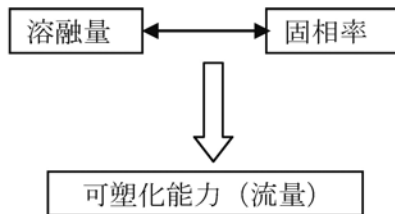



図2　本研究の計算順序

2. 解析概要

開発環境はFortran IA-32,version 14.0.0.103である。解析対象は図3に示す単軸のシングルフライトスクリュであり、解析範囲はスクリュ供給部から計量部である。

インライン射出成形では可塑化時にスクリュが後退し、射出時には前進、中間時間などではスクリュは回転を停止するが、本報告ではスクリュ位置を固定し、スクリュが連続回転する条件下で解析を実行した。

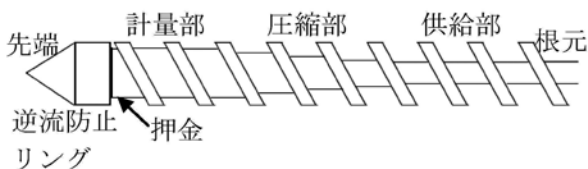



図3　スクリュ

3. 解析方法

3.1　溶融計算のモデル

固相率の計算はTadmor[4]が示した溶融可塑化モデルである3ゾーンモデルを用いる。3ゾーンとは、図4に示すように、スクリュ溝内で樹脂を固体であるソリッドベッド、溶融体であるメルトフィルム、メルトプールの3つのゾーンに分けて計算するモデルである。

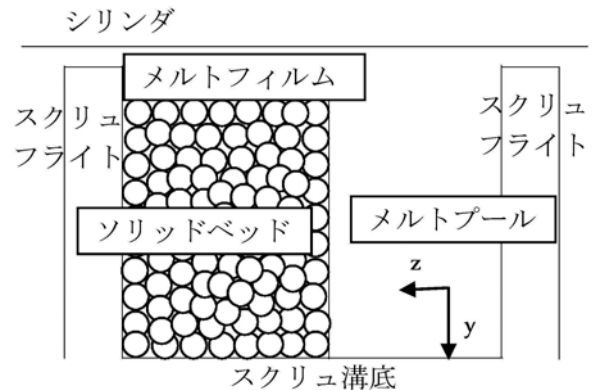



図4　3ゾーンモデル

また、本解析では図5に示すスクリュ展開モデルを用いて、スクリュ軸方向へ計算を3ゾーンモデルの計算を展開した。この溶融計算のモデルでは、スクリュ根元側から先端側への流れを計算する。そのとき、流れの1方向性（根元から先端）を仮定する。

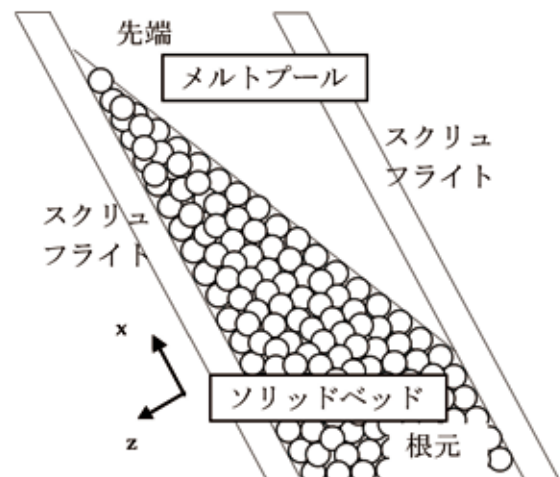



図5　スクリュ展開図

3.2　流動解析を用いた可塑化解析の流れ

図6のフローチャートに示すように、本計算では、可塑化能力を用いて、固相率、樹脂温度を計算する。したがって、可塑化能力の計算精度が、解析全体の計算精度に影響する。そこで、可塑化能力の計算には流動解析を用いる。

流動解析には、Patankar が示したコントロール・ボリュームによる定式化[1]の方法を用いた。今回の可塑化計算は定常解析ではあるが、定常状態になるまで非定常計算を行っている。解法は陽解法である。メッシュの区分を図7に示す。メッシュをメルトプール、背圧を設定するメルトプール（出口）、メルトプールに隣接するメルトフィルム、メルトプールに隣接しないメルトフィルム、ソリッドベッドの5つに区分し、メルトプール、メルトプール（出口）、メルトプールに隣接するメルトフィルムを計算領域とする。ここで、流動解析の境界条件はスクリュが固定壁、シリンダが動く壁、ソリッドベッドが固定壁である。

また、可塑化能力を計算する上で重要な溶融量の計算に関わるメルトフィルムのせん断速度計算についても、計算精度向上のため、流動計算を用いる。ただし、このメルトフィルムのせん断速度計算は計算速度向上のため、2次元で実施する。このため、サブルーチンとして取り扱うと計算上便利である。

図7　流動計算のメッシュ

初期可塑化能力

初期固相率
初期樹脂温度
etc.

【サブルーチン】
初期メルトフィルムせん断エネルギー
（2次元流動計算）

可塑化能力（3次元流動計算）

固相率
樹脂温度
etc.

【サブルーチン】
メルトフィルムせん断エネルギー
（2次元流動計算）

可塑化能力が収束

終了

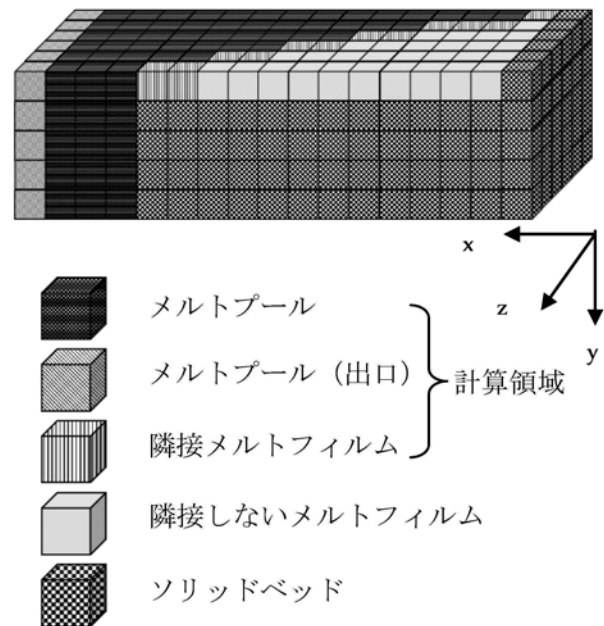
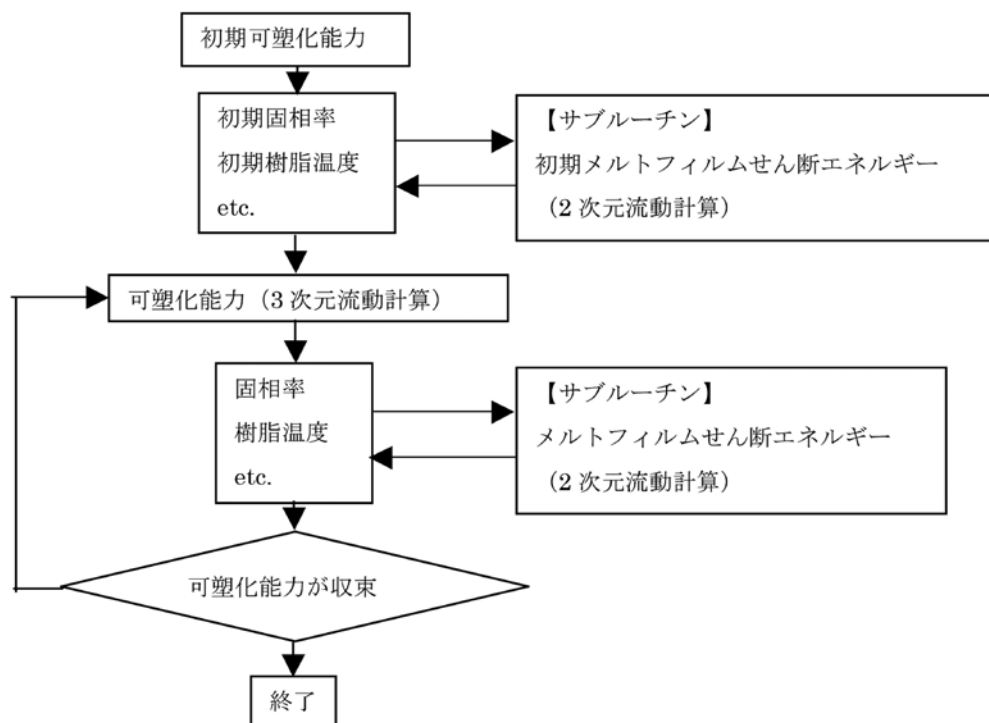



図6 フローチャート

4. 理論と方程式

4.1 保存則による流動計算

Patankarによると保存則を用いて連続の式、運動方程式をたてる。拡散係数（粘度）をΓ [Pa・s]、密度をρ[kg/m^3]、速度をu[m/s]、圧力をP[Pa]とする。連続の式は

$$div(u) = 0 \quad \cdots\cdots(1)$$

運動方程式はx方向を代表として書くと

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + div(\rho uu) = div(\Gamma grad u) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad \cdot\cdot(2)$$

である。ここで、左辺1項目は非定常項、左辺2項目は対流項、右辺1項目は拡散項、右辺2項目は生成項である。

4.2 可塑化能力の計算

流動解析を用いた可塑化能力の計算では、まず、メルトプールの形状を決定し、流動解析はこの決定されたメルトプール形状に対して実行する。今回は3次元非圧縮の流動解析を用い、樹脂の流れ方向x、スクリュ溝深さ方向y、スクリュ溝幅方向zの流速u[m/s]、v [m/s]、w [m/s]と圧力の定常解を非定常計算で求める。その上で、スクリュ先端のx方向流速u[m/s]の平均値にスクリュ溝深さh[m]とスクリュ溝幅w_b[m]を乗じて流量Q [m^3/s]を算出する。スクリュ溝深さ方向をy、スクリュ溝幅方向をzとするとスクリュ先端でのメッシュ数はそれぞれny、nzと書ける。ここで、y方向のメッシュ番号j、z方向のメッシュ番号kとして

$$Q = \frac{\sum_{j,k} u}{ny \cdot nz} \cdot h \cdot w_b \quad \cdots\cdots(3)$$

この流量に溶融樹脂密度ρ_m[kg/m^3]をかけて、単位をあわせることによって、質量流量つまり可塑化能力Q_{kgh}[kg/h]を算出した。

$$Q_{kgh} = \rho \cdot Q \cdot 3600 \quad \cdots\cdots(4)$$

4.3 溶融モデルと熱流束

Tadmorが示した溶融可塑化の式は複雑であるが、その式は熱流束の考え方[5]に準拠した式である。Tadmorが示した溶融計算の導出過程の式では、

$$-\left[q_y\right]_{y=0} = k_m\left(\frac{dT}{dy}\right)_{y=0} = \frac{k_m}{\delta}\left(T_b - T_m\right) + \frac{\mu_u V_j^2}{2\delta} \quad (5)$$

$$-\left[q_y\right]_{y=0} = k_m\left(\frac{dT}{dy}\right)_{y=0} = \rho_s c_s V_{sy}\left(T_m - T_s\right) \quad \cdot\cdot(6)$$

となっている。ここで、q_y[W/m^2]はソリッドベッドからシリンダへの熱流束、k_m[W/m/K]は溶融樹脂の熱伝導率、dT[℃]はメルトフィルム厚み方向メッシュ内温度変化量、dy[m]はメルトフィルム厚み方向メッシュ長さ、δ [m]はメルトフィルム厚み、T_b[℃]はシリンダ温度、T_m[℃]は樹脂融点、u[Pas]は樹脂粘度、V_j[m/s]はシリンダとソリッドベッドの相対速度、ρ_s[kg/m^3]は固体樹脂密度、c_s[J/kg/K]は固体樹脂比熱、V_{sy}[m/s]はシリンダにソリッドベッドが変形して近づく速度、T_s[℃]はソリッドベッド温度である。

そこで、図8に示す熱流束の考え方を用いて、Tadmorが示した式(5)(6)をメルトフィルム温度も計算できる形にして、可塑化解析の理論を考えた。ここで、図中ではソリッドベッドをSB、メルトフィルムをMF、メルトプールをMPと記述する。Tadmorの理論では熱流束がシリンダからソリッドベッドへ直接入っていたが、メルトフィルムの厚みの中央点（図8のT_f）に温度計算点を作ることで、熱移動の計算精度を向上した。領域の分割は3ゾーンモデルを用いる。

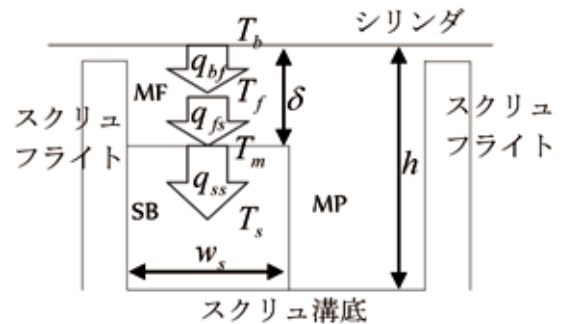



図8 メルトフィルムと樹脂溶融の熱流束

まず、メルトフィルムでの樹脂溶融について考える。ここで、計算で求めなければならないものは図8に示す熱流束q_{bf}[W/m^2]と熱流束q_{fs}[W/m^2]の節点の温度であるメルトフィルムの厚み方向中央点の温度と熱流束q_{ss}[W/m^2]の節点の温度であるソリッドベッドの厚み方向中央点の温度である。メルトフィルムとソリッドベッドの界面も熱流束q_{fs}[W/m^2]と熱流束q_{ss}[W/m^2]の節点であるが、ここの温度は相変化の点なので樹脂融点と決まる。

ここで、メルトフィルム中央の温度を求める必要があるため、シリンダを熱浴として、シリンダ壁面からメルトフィルム中央への熱流束 q_{bf}[W/m^2] とメルトフィルム中央からメルトフィルムとソリッドベッドの界面への熱流束 q_{fs}[W/m^2] の式をたてる。シリンダ壁面からメルトフィルム中央への熱流束は

$$q_{bf} = \frac{2k_m}{\delta}\left(T_b - T_f\right) \quad \cdots\cdots(7)$$

であり、シリンダからメルトフィルム中央へ流れる熱流量 Q_{bf}[W] は

$$Q_{bf} = q_{bf} \cdot w_s \cdot dx \quad \cdots\cdots(8)$$

である。T_f[℃] はメルトフィルム温度、w_s[m] はソリッドベッド幅、dx[m] は流れ方向メッシュ幅である。メルトフィルム中央からメルトフィルムとソリッドベッドの界面への熱流束 q_{fs}[W/m^2] は

$$q_{fs} = \frac{2k_m}{\delta}\left(T_f - T_m\right) \quad \cdots\cdots(9)$$

であり、メルトフィルム中央からメルトフィルムとソリッドベッドの界面へ流れる熱流量 Q_{fs}[W] は

$$Q_{fs} = q_{fs} \cdot w_s \cdot dx \quad \cdots\cdots(10)$$

である。これらから、1ステップ前のメルトフィルム温度 T_{fold}[℃] を用いてメルトフィルム温度を決定する。メルトフィルム温度 T_f[℃] は

$$T_f = T_{fold} + \frac{\left(Q_{bf} - Q_{fs}\right) \cdot dt}{\rho_m \cdot C_{pm} \cdot \delta \cdot w_s \cdot dx} \quad \cdots\cdots(11)$$

と求まる。ρ_m[kg/m^3] は溶融体密度、C_{pm}[J/kg/K] は溶融体比熱、dt[s] は時間刻みである。

ソリッドベッドの温度も求める必要がある。メルトフィルムとソリッドベッドの界面からソリッドベッド中心への熱流束 q_{ss}[W/m^2] は

$$q_{ss} = \frac{2k_m}{h-\delta}\left(T_m - T_s\right) \quad \cdots\cdots(12)$$

であり、メルトフィルムとソリッドベッドの界面からソリッドベッド中心へ流れる熱流量 Q_{ss}[W] は

$$Q_{ss} = q_{ss} \cdot w_s \cdot dx \quad \cdots\cdots(13)$$

である。h[m] はスクリュ溝深さである。ここで、ソリッドベッドはプラグとみなしている。これから、ソリッドベッドの温度 T_s[℃] は1時間ステップ前のソリッドベッドの温度 T_{sold}[℃] を用いて

$$T_s = T_{sold} + \frac{Q_{ss} \cdot dt}{\rho_s \cdot C_{ps} \cdot \left(h - \delta\right) \cdot w_s \cdot dx} \quad \cdots\cdots(14)$$

となる。したがって、溶融するソリッドベッドの高さ $d\delta$[m] は

$$d\delta = \frac{\left(Q_{fs} - Q_{ss} + E_f \cdot w_s \cdot \delta \cdot dx\right) \cdot dt}{\rho_s \cdot C_{ps} \cdot \triangle T \cdot w_s \cdot dx} \quad \cdots\cdots(15)$$

となる。ここで、E_f[W/m^3] はメルトフィルムで発生するせん断エネルギーである。新しいメルトフィルム温度 T_{fnew}[℃] は

$$T_{fnew} = \frac{T_f \cdot \delta + T_m \cdot d\delta}{\delta + d\delta} \quad \cdots\cdots(16)$$

となる。さらに、メルトフィルムのメルトプールへのかき出し量 dV[m^3] を計算する。メルトフィルムのかきだし速度は分布を持つので、平均速度で説明する。ここでは簡単のため、メルトフィルムはスクリュ溝幅方向に速度 v_x[m/s] でかき出されるとすると、かき出し量は

$$dV = v_x \cdot \delta \cdot dx \cdot dt \quad \cdots\cdots(17)$$

なので、新しいメルトフィルムの厚み δ_{new}[m] は

$$\delta_{new} = \frac{\delta \cdot w_s \cdot dx - dV}{w_s \cdot dx} \quad \cdots\cdots(18)$$

となる。この計算を流れ方向に逐次実行することでソリッドベッドの溶融を計算する。

4.4 メルトフィルムのせん断速度計算

メルトフィルムのせん断速度計算には、メルトフィルム内の速度分布が必要である。したがって、これを2次元非圧縮の流動計算でメッシュごとに求めた。

ここで、図9に示すようにメルトフィルム厚み方向（スクリュ溝深さ方向）に線形に温度分布を仮定した。理由は、メルトフィルムが0.1mmから0.2mm程度と薄いこと、メルトフィルムは温度の決まっているシリンダとソリッドベッドの界面（固体と溶融体の界面なので温度は融点と決まっている）にはさまれており、境界条件が決まっていることにある。

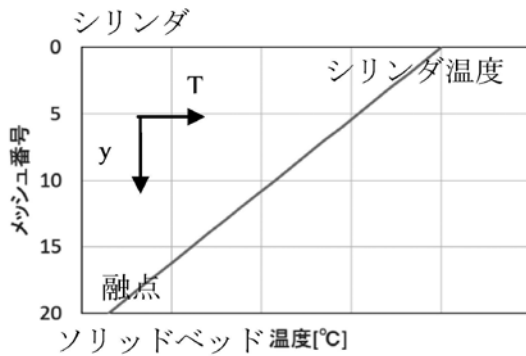



図9　メルトフィルム内温度分布

この条件でメルトフィルムの速度分布を計算すると図10のように曲線の速度分布が得られる。ここではポリプロピレン樹脂（PP）を用いた計算結果を例にとる。

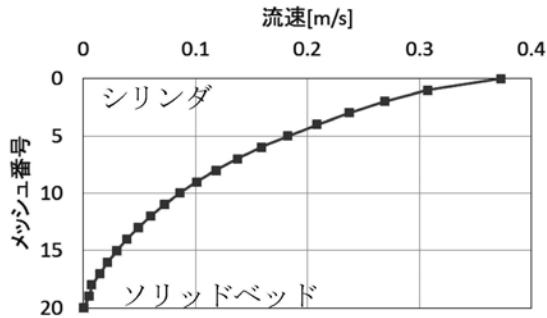



図10　メルトフィルム内速度分布（PP）

この曲線は樹脂の物性（粘度、融点）だけでなく、シリンダの設定温度、メルトフィルム厚みにも影響されるため、樹脂の違いのみならず、メッシュごとに異なる曲線となる。この、速度分布を用いて、せん断速度分布を計算する。あるメッシュにおけるせん断速度$\dot{\gamma}$[1/s]は、あるメッシュをnとし、そのメッシュからメルトフィルム厚み方向シリンダ側となりのメッシュをjmとすると

$$\dot{\gamma} = \frac{u_{jm} - u_n}{dy} \quad \cdots\cdots(19)$$

である。dy[m]は、メッシュ厚みである。各メッシュのせん断速度が求まれば、温度は線形の分布を仮定し、分かっているので粘度が求まる。粘度η [Pa・s]はCarreauモデルで求めた。

$$\eta = \frac{A \cdot \alpha}{\left[1 + \left(c \cdot \alpha \cdot \dot{\gamma}\right)^a\right]^{\frac{1-n}{a}}} \quad \cdots\cdots(20)$$

$$\alpha = \exp\left[-b\left(T - T_r\right)\right] \quad \cdots\cdots(21)$$

A[Pas]、α[-]、a[-]、b[1/℃]、c[s]、T_r[℃]はCarreauモデルのパラメータである。T[℃]は樹脂温度である。したがって、せん断応力とせん断エネルギーも求まり、その平均をとればメルトフィルムのせん断応力、せん断エネルギーを求めることができる。せん断応力τ[Pa]は

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad \cdots\cdots(22)$$

である。

4.5 せん断エネルギー

η [Pa・s]を粘度、$\dot{\gamma}$ [1/s]をせん断速度とするとせん断エネルギーE[W/m^3]は

$$E = \eta \dot{\gamma}^2 \quad \cdots\cdots(23)$$

と書ける。せん断エネルギーは単位体積あたりのエネルギーである。

4.6 回転トルク

$\varDelta V$[m^3]を単位メッシュあたりの溶融体の体積とすると、溶融体による回転トルクT_{or} [W]は溶融体が存在する最もスクリュ根元に近いメッシュを$istart$、スクリュ先端メッシュを$iend$とすると、x方向のメッシュ番号をiとして

$$T_{or} = \sum_{i=istart}^{iend} E_i \varDelta V_i \quad \cdots\cdots(24)$$

と書ける。これを、メルトフィルムとメルトプールそれぞれで算出し、たし合わせて回転トルクとした。

以上、諸式を用いて可塑化能力、回転トルクを求めた。

5. 実験及び計算条件

スクリュ　　　：フルフライトスクリュ
（ϕ 66mm、L/D=19.64、CR=2.0）
スクリュ回転数：120rpm
シリンダ温度　：200℃
背　　圧　　　：5MPa
樹　　脂　　　：ポリプロピレン（PP）
（プライムポリマー J105G）
：低密度ポリエチレン（PE）
（住友化学 G701）

6. 結果と考察

6.1 可塑化能力

PPとPEに関して、可塑化能力を計算した結果を図11に示す。

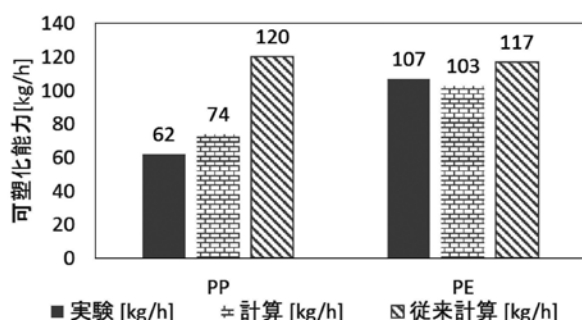



図11　可塑化能力

従来法ではスクリュ特性式

$$Q = \alpha \cdot N - \frac{\beta}{\mu} \cdot \frac{dP}{dx} \quad \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot (25)$$

を用いて、流量に対する制限もかけることなく計算していた。Q[m^3/s]は流量、α[m^3]は形状係数、β[m^4]は形状係数、N[rps]はスクリュ回転数、μ[Pa・s]は粘度、$\frac{dP}{dx}$[Pa]は圧力勾配である。

しかし、本計算では、メルトフィルム内の樹脂の速度分布からせん断速度分布を計算し、樹脂の溶融量の計算に反映させた。また、溶融量以上は流量が発生しない制限を設けた流動計算を用いて可塑化能力を計算した。その結果、可塑化能力の計算結果が実験結果に近づいた。

6.2 回転トルク

回転トルクはメルトフィルムとメルトプールのせん断エネルギーから計算した。計算結果を図12に示す。

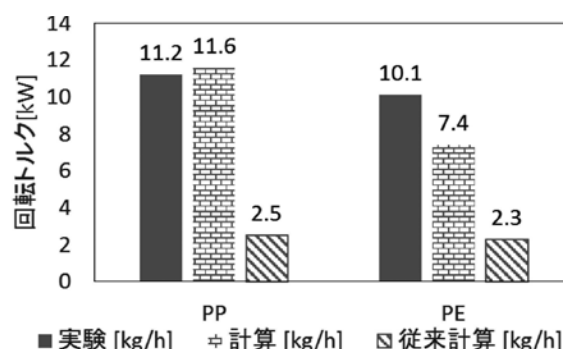



図12　回転トルク

従来のメルトフィルム内のせん断速度一定の仮定で計算した回転トルクに対して、メルトフィルム内のせん断速度の分布を計算し、そのせん断速度を用いてせん断エネルギーを計算した本方法において、回転トルクの計算値は実験値に近づいた。

7. まとめ

流動解析の手法を可塑化解析に適用したこととメルトフィルムのせん断速度分布を計算したことによって、可塑化能力、回転トルクの計算値と実験値は近づいた。したがって、可塑化能力は樹脂の溶融量で制限される場合があると考えられる。したがって、本方法は可塑化能力の計算精度向上に有効であると考えられる。

参考文献

1) S.V.Patankar：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, p.82, 森北出版(株)(1985)
2) 巽友正：連続体の力学, p.184, (株)岩波書店(1995)
3) 和達三樹：物理のための数学, p.55, (株)岩波書店(1983)
4) Z.Tadmor, I.Klein：Engineering Principles of Plasticating Extrusion, p.110, Van Nostrand Reinhold Book co.(1970)
5) (社)プラスチック成形加工学会編：成形加工における移動現象, p.93, 森北出版(株)(2011)

MPS 法を用いた樹脂流動解析

Numerical Analysis of Polymer Fluid Flow Using the MPS Method

博士（工学）福澤　洋平*
Dr. Yohei Fukuzawa

博士（工学）富山　秀樹*
Dr. Hideki Tomiyama

博士（工学）柴田　和也**
Dr. Kazuya Shibata

工学博士　越塚　誠一**
Dr. Seiichi Koshizuka

要　　旨

粒子法解法の一種であるMPS（Moving Particle Simulation）法に溶融樹脂流体を対象とした新たな解析機能の開発を行った。冷却・凝固の相変化を含めた温度場演算機能の開発を行い、壁境界には従来手法である壁粒子を用いる手法ではなくポリゴン壁を用いた。基礎的な剪断流れ場である円筒クエット流による温度予測と金型内への樹脂充填・凝固の一連挙動をMPS法にて予測し、良好な結果が得られた。本報ではこれら新機能の演算手法と検証評価について述べる。

—— Synopsis ——

Numerical analysis program of polymer fluid flow is newly developed using the MPS (Moving Particle Simulation) method which is one of the particle methods. In this program, the temperature calculation is considered the effect of solid-liquid transition. In addition, the wall boundary is modeled using polygon-wall instead of wall particle in the original MPS method. The temperature of the basic shear flow field in a cylindrical Couette flow are predicted and the polymer behavior from filling to solidification in the mold are analyzed. In both cases, good results are obtained. In this paper, we present the improvement of the MPS method and the verification of calculation method.

1. 緒　　言

樹脂の流動解析手法としてFEM（Finite Element Method）やFAN法（Flow Analysis Network method）などが主に使用されているが、近年ではラグランジュ法をベースとした粒子法解析の適用例も増えている。粒子法解析は、混相流や自由表面が変形する問題に対して容易に予測できることが最大の特徴であり、これらの流れ場を有するダイ内の多層流動解析や非充満領域を含む二軸押出機内の挙動予測など、プラスチック成形加工プロセスへの適用が期待される。当社では粒子法の代表的手法の一つであるMPS法（Moving Particle Simulation method）[1]をベースとしたオリジナルの理論モデルとプログラムの開発を進め、基礎的な流れ場での検証による妥当性評価を行ってきた。たとえば、従来のMPS法では低粘性ニュートン流体を対象とした流動解析が主流であったが、高粘性非ニュートン流体モデルを導入することで樹脂流動予測を可能にするなど[2][3]、より実用的なプロセス予測を可能とするための新たな演算モデルの提案や機能開発を進めている。

プラスチック成形加工プロセスでは、樹脂の温度領域は広域に渡って変化し、それに伴い樹脂物性が変化することで溶融樹脂の流体挙動にも影響を及ぼす。特に、成形品の形状付与には溶融樹脂を冷却・固化する工程が必ず必要であるため、状態変化を含めた温度場演算機能が開発できると押出機内の溶融混練挙動から冷却固化までの広範囲にわたる一貫予測が可能になり、混練挙動や温度ムラが成形品に与える影響を予測しやすくなる。ただ、粒子法解析で解析対象領域を広げた場合は、粒子数の増加により計算時間を含めた演算効率が極端に低下する懸念を有するため、その打開策を講じることも必要となる。

*：広島研究所
Hiroshima Research Laboratory

**：東京大学大学院工学系研究科システム創生学専攻
Department of Systems Innovation School of Engineering, The University of Tokyo

本研究では、新たに冷却・凝固の相変化を含めた温度場演算機能の開発を行うと同時に、演算効率の向上を目的としたポリゴン壁モデルの導入を試みた。本報ではこれら新機能の演算手法と検証評価について述べる。

2. MPS 法アルゴリズム

2.1 溶融樹脂モデルを導入した運動方程式の演算手法

溶融樹脂は非圧縮性の非ニュートン流体であり、連続体とみなした樹脂流体の支配方程式は次式の連続の式とナビエストークス方程式によって表すことができる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta \nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} \quad \cdots\cdots (2)$$

$\mathbf{u}$ は速度ベクトル、ρ は流体密度、t は時間、p は圧力、η は剪断粘度、$\mathbf{g}$ は重力である。溶融樹脂は、剪断速度 $\dot{\gamma}$ の増加に伴い剪断粘度 η が低下する擬塑性非ニュートン流体である。本研究では、この流体の粘度を表現する構成方程式に Power-law モデルを用いた。

$$\eta = \eta_0 \dot{\gamma}^{n-1} \quad \cdots\cdots (3)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\mathbf{D} : \mathbf{D}} \quad \cdots\cdots (4)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}\left\{ \langle \nabla \mathbf{u} \rangle + \langle \nabla \mathbf{u}^t \rangle \right\} \quad \cdots\cdots (5)$$

η_0 はゼロ剪断粘度、n は Power-law index、$\mathbf{D}$ は変形速度テンソルである。

MPS 法では (2)、(5) 式の勾配 (∇) とラプラシアン (∇^2) の微分演算子に対して、ある粒子 i とその近傍の粒子 j との間で相互作用モデルを与え離散化を行う。粒子 i の物理量 ϕ に対して勾配モデルとラプラシアンモデルはそれぞれ以下の式で定義される。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{(\phi_j - \phi_i)}{|r_{ij}|^2} r_{ij} w_{ij} \quad \cdots\cdots (6)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n_0} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) w_{ij} \quad \cdots\cdots (7)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} |r_{ij}|^2 w_{ij}}{\sum_{j \neq i} w_{ij}} \quad \cdots\cdots (8)$$

r_{ij} は粒子間距離、d は空間次元数、n_0 は初期配置での粒子数密度、w_{ij} は重み関数、λ は係数である。MPS 法において、各粒子間の相互作用は、粒子の有効半径内に位置する近傍粒子との粒子間距離に応じて重み付き平均を求めることで評価する。その際用いる重み関数 w_{ij} は粒子間距離 r_{ij} に対して (9) 式から求められる。また、MPS 法では、粒子 i における密度 ρ_i の代わりに粒子数密度 n_i を用いる。粒子数密度 n_i は重み関数 w_{ij} を用いて (10) 式で定義する。

$$w_{ij} = \begin{cases} \dfrac{r_e}{r_{ij}} - 1 & (r_{ij} < r_e) \\ 0 & (r_{ij} \geq r_e) \end{cases} \quad \cdots\cdots (9)$$

$$n_i = \sum_{j \neq i} w_{ij} \quad \cdots\cdots (10)$$

r_e は粒子間相互作用の及ぶ有効半径であり、影響半径と定義する。一般的に、影響半径 r_e は 2.1 ～ 4.1 の値を用いる。

MPS 法は各時間ステップに対して (2) 式の粘性・重力項を陽的に計算し、圧力項は陰的に計算する半陰的アルゴリズムが一般的な特徴とされる[(1)(4)]。しかし、粘性項の陽的計算では刻み時間に制約があり、溶融樹脂のような高粘性解析では刻み時間を非常に細かく設定する必要がある。しかしながら、この手法では計算ステップ数が増加し膨大な演算時間を要することになるため、本研究では粘性項を陰的に計算する完全陰的アルゴリズム手法[(5)]を採用した[(2)(3)]。

2.2 温度場の演算手法

温度場演算はナビエストークス演算終了後に行う。温度演算には次式で表されるエネルギー方程式を用いる。

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \eta \dot{\gamma}^2 \quad \cdots\cdots (11)$$

C_p は定圧比熱、T は温度、k は熱伝導率である。右辺第 1 項は移流項、第 2 項は剪断応力による発熱量を表す項である。次に (11) 式を陽的に変換すると次式が得られる。

$$\frac{T^{m+1} - T^m}{\Delta t} = \frac{k}{\rho C_p} \left\{ (\nabla^2 T)^m + \eta \dot{\gamma}^2 \right\} \quad \cdots\cdots (12)$$

m は計算ステップ数である。(12) 式の離散化はナビエストークス計算と同様に相互作用モデルである勾配モデル (6) 式とラプラシアンモデル (7) 式を用いた。移流項はラプラシアンモデル (7) 式を用い、剪断発熱項は勾配モデル (6) 式にて離散化を施すことで温度を算出した。

また、凝固予測では凝固点以下に冷却された粒子は流動を止める条件を与えた。

3.　ポリゴン壁モデルの導入

一般的な MPS 法の演算では壁粒子を用いることで壁境界をモデル化するが、これでは斜面などの形状を滑らかに表現できず境界の形状再現性に劣り、流体粒子を含めた全粒子数に対し壁粒子が 8 割程度にも及ぶため演算効率が低下する、といった問題が生じる。図 1 に示すポリゴン壁モデル[6] [7]では、3D-CAD で作成した形状（ポリゴンデータ）をそのまま壁境界として扱うことで滑らかな形状を表現でき、壁粒子の生成も不要となるため大幅な粒子数削減が可能となり演算効率が向上する。

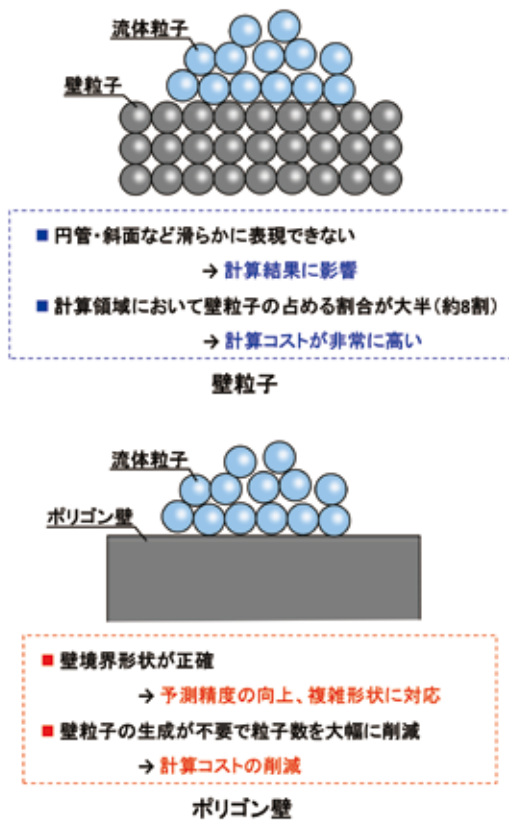



図 1　ポリゴン壁モデルの導入

ポリゴン壁モデルの演算手順を以下に示す。

(1) CAD データ（ポリゴン壁）を STL 形式にて読込む
(2) ポリゴン位置から計算領域との距離を演算（距離関数の導出）し、計算粒子とポリゴン壁までの距離を算出
(3) (2) で算出した距離を用いて、ポリゴン壁から流体粒子に寄与する壁重み関数を導出
(4) 壁重み関数を適用した離散化方程式による速度、圧力、温度の演算

これらの導出・演算手法等の詳細を以下に説明する。

3.1　距離関数の導出

ポリゴン壁モデルを導入する上では、ポリゴン位置から計算領域（流体粒子が存在する領域）の距離関数を算出することが最も重要であり、解析精度に直接影響を与える。この算出手法は数々提案されているが、今回は MPS とは異なる粒子法である DEM（Discrete Element Method）の接触判定によく用いられる符号付距離関数（Signed Distance Function; SDF）[8] を採用した。

STL（Standard Triangulated Language：三次元ポリゴンデータ）は三角形要素（1 面 3 節点）で構成されており、このポリゴンデータ（節点数、節点座標、面の表・裏向きを表す法線ベクトル）から計算領域内の距離を導出する。図 2 に示す導出手順を以下に述べる。

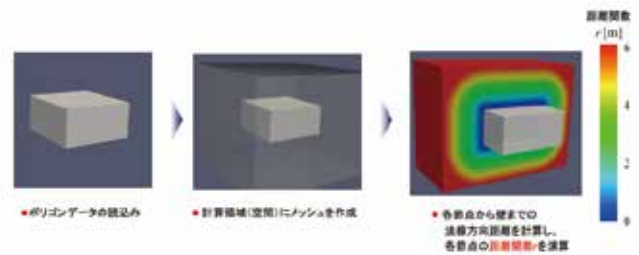



図 2　距離関数の導出方法

(1) ポリゴンデータを読込み、計算領域内においてポリゴンから粒子の影響半径の 1.5 ～ 2.0 倍程度の領域にメッシュを作成する。メッシュサイズは粒子径の 1/4 程度と設定することで、より厳密に距離が算出可能である。
(2) メッシュの各点とポリゴン面との法線距離（最短距離）を求め、計算領域の距離関数を求める。
(3) 粒子が計算領域内のいずれのメッシュに存在するかを探索した後、(2) で算出した距離関数を用いて粒子とポリゴンまでの距離を線形補間にて算出する。

3.2　壁重み関数の導出

従来の壁粒子を用いた解析手法では、流体粒子の影響半径内に壁粒子が存在するとき、各壁粒子との相互作用つまり重み関数 w_{ij} に基づいて流体粒子の物理量を計算する。図 3 に示すように、ポリゴン壁モデルではポリゴンから流体粒子への寄与として壁重み関数 $W(r_w)$ によって計算する。この $W(r_w)$ は壁粒子を配置させたときの重み関数と同等の値でなければならず、$W(r_w)$ は壁粒子との重み関数 w_{ij} の総和で算出できる。

$$W(r_w) = \sum_{j=wall} w_{ij} \qquad \cdots\cdots(13)$$

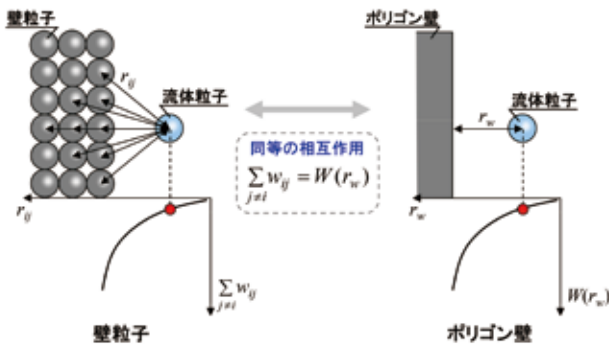



図 3　壁境界との相互作用

$W(r_w)$ は粒子径と影響半径に応じて解析実行前に予め設定する必要があり、単純立方格子状に壁粒子を配置させた状態で流体粒子と壁面までの距離 r_w を変化させ、図 4 に示す要領で各距離に対して算出を行う。図 5 に影響半径が 3.1 のときの $W(r_w)$ と r_w の関係を示す。このように各距離に対して算出した $W(r_w)$ をカーブフィッティングすることで任意の位置での $W(r_w)$ を求めることができる。

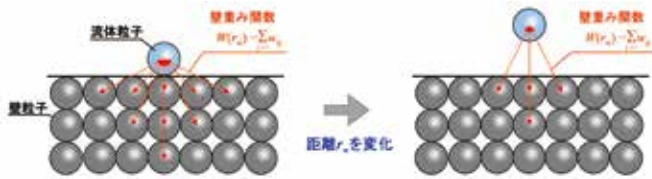



図 4　壁重み関数 $W(r_w)$ の算出方法

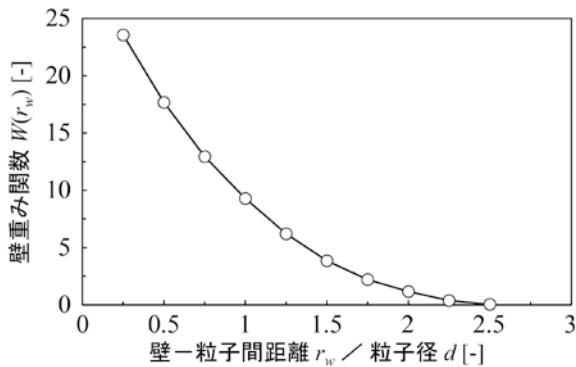



図 5　壁重み関数 $W(r_w)$

3.3　ポリゴン壁モデルの離散化手法

ポリゴン壁モデルを用いた場合の離散化は、流体粒子による寄与と壁境界による寄与に分けることができ、各方程式の微分演算子に対して MPS 法の勾配 (6)式とラプラシアンモデル (7)式は次式のように変形できる。

$$\nabla\phi = \nabla\phi_{fluid} + \nabla\phi_{wall} = \frac{d}{n_0}\sum_{j\neq i}\frac{\left(\phi_j - \phi_i\right)}{\left|r_{ij}\right|^2} r_{ij} w_{ij} + \frac{d}{n_0}\frac{\left(\phi_{wall} - \phi_i\right)}{\left|r_w\right|^2} r_w W(r_w) \quad (14)$$

$$\nabla^2\phi = \nabla^2\phi_{fluid} + \nabla^2\phi_{wall} = \left[\frac{2d}{\lambda n_0}\sum_{j\neq i}\left(\phi_j - \phi_i\right) w_{ij}\right] + \left[\frac{2d}{\lambda n_0}\left(\phi_{wall} - \phi_i\right) W(r_w)\right] \quad (15)$$

ϕ_{fluid} と ϕ_{wall} はそれぞれ流体粒子とポリゴン壁によって寄与する物理量、r_w は粒子 i の壁面までの距離である。これらのモデルを用いて、運動方程式 (2)式とエネルギ方程式 (11)式を離散化することで、それぞれの運動量の演算を行う。

4.　検証解析

4.1　円筒クエット流

非ニュートン流体の流動と温度分布の予測検証を実施するために、図 6 に示す円筒流路における剪断クエット流れ場の解析を行った。壁面はポリゴンでモデル化し、内壁温度 T_0=0℃、外壁温度 T_1=100℃に設定を行い、内壁は固定した状態で外壁を回転速度 ω =0.5s^{-1}（速度 U=5mm/s）で回転させた。また、円筒の側面は non-slip、底面は slip 条件とした。

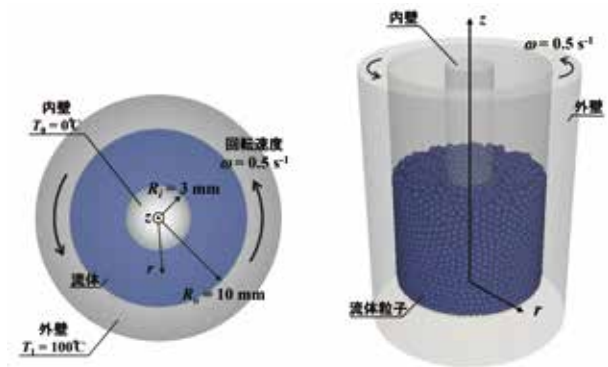



図 6　解析モデル：円筒クエット流

まず、非ニュートン流体の挙動を評価するため、速度分布について検証を行った。予測値の検証には、(16) 式で求まる Power-law モデルを適用した速度理論値と比較した。

$$u = \frac{1 - \left(R_i / r\right)^{\frac{2}{n}}}{1 - \left(R_i / R_o\right)^{\frac{2}{n}}}\,\omega r \quad \cdots\cdots(16)$$

u は周方向速度、R_i と R_o は内壁と外壁の半径、r は半径座標である。(3) 式の粘度パラメータは n=0.6、η_0=10^{3}Pa･s とした。図 7 に各時間で (16) 式から求まる周方向の速度理論値を示す。時間進行につれ、徐々に外側から回転速度が上昇し、最終的に理論値へと発達していくことが分かる。内・外の両壁近傍の高剪断速度領域ではわずかではあるが粘度低下による速度上昇が確認でき、非ニュートン流体の挙動を定性的に表現できている。理論値と比較すると若干の差異が生じており、理論値 (16)式は重力を無視（z 方向速度は 0）した境界条件により導出しているが、一方で今回の解析モデルでは重力を加味していることから、z 方向にも多少速度が発生するため理論値とは完全に一致しない結果となる。

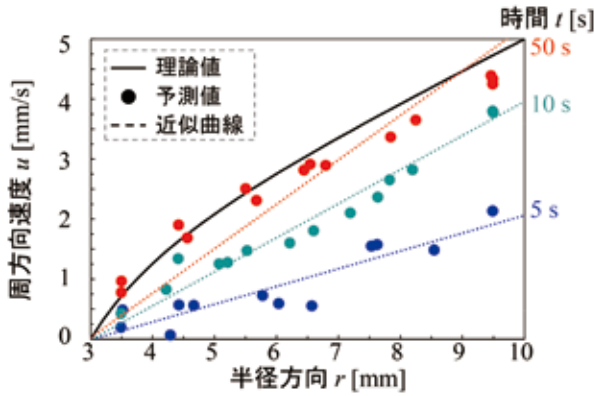



図 7　周方向の速度理論値と予測値

次に温度場予測について評価を行った。評価の比較対象には、(17) 式で求まる定常状態での温度分布の理論値を用いた[9]。

$$\frac{T-T_0}{T_1-T_0}=(B+1)\left(1-\frac{\ln R}{\ln m}\right)+B\left(\frac{\ln R}{m^2\ln m}-\frac{1}{R^2}\right)$$
$$R=\frac{r}{R_o},\quad m=\frac{R_i}{R_o},\quad B=Br\frac{m^4}{(1-m^2)^2},\quad Br=\frac{\eta U^2}{k(T_1-T_0)} \qquad (17)$$

Br は剪断発熱量の大小を示すブリンクマン数である。解析に用いた流体モデルは、純粋に剪断発熱による温度上昇を検討するため、 $\eta=10^3$Pa·s のニュートン流体とし、Br=0, 10, 20 の 3 流体とした（Br=0 は伝熱のみの影響）。図 8 に定常状態での各流体モデルの温度分布予測と理論値を示す。Br が大きくなるにつれ剪断発熱量が大きく、全体的に温度上昇が確認できる。解析値と理論値を比較すると、どの流体モデルでも両者の傾向は捉えているが、完全に一致する結果は得られていない。これは、速度結果が理論値と完全に一致しなかったことが原因であり、速度結果を基に剪断発熱量を算出している温度計算においても誤差が生じる結果となる。これらの速度誤差の原因を踏まえると温度場は十分な予測精度と判断できる。

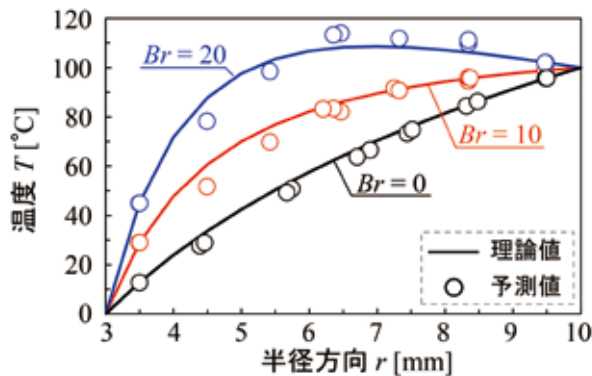



図 8　各流体モデルの温度理論値と予測値

4.2　凝固プロセス予測

溶融樹脂流体を金型内に流入させ充填挙動と冷却・凝固のプロセスを予測した。流れ場は、図 9 に示す厚さ 5 mm の平板形状の金型内に粒子径 1 mm の溶融樹脂流体を流入流速 5 mm/s の条件で流入させる条件とした。金型の温度は 20℃とし、流体は流入温度 200℃、凝固点 130℃、熱伝導率 0.3W/(m·K)、凝固潜熱は樹脂比熱 2800J/(kg·K) とした。また剪断粘度の温度依存性に関しては (18)、(19) 式に示す温度シフトファクターを適用したモデルを用いた。

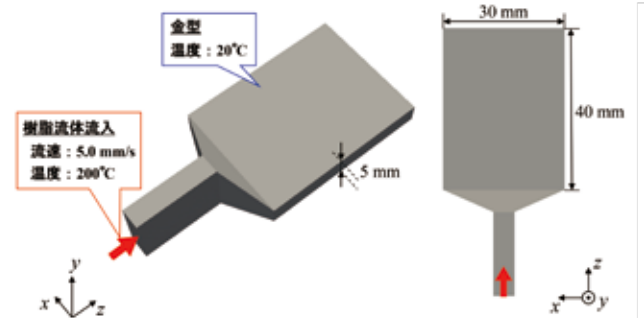



図 9　金型形状モデルと計算条件

$$\eta=a_T\eta_0\dot{\gamma}^{n-1} \qquad \cdots\cdots(18)$$

$$a_T=\exp[C(T-T_0)] \qquad \cdots\cdots(19)$$

a_T はアレニウス型のシフトファクター、C はパラメータ、T_0 は参照温度である。今回の解析では、C=-0.02、T_0= 150℃、n=0.6 とした。

図 10 に金型内へ樹脂が充填する挙動の予測結果を示す。金型に流入した樹脂は冷却面に接触することで温度が低下し、壁面近傍の樹脂速度は若干低下するが、ほぼ一様に充填が進行する。また冷却面近傍の樹脂は温度低下に伴う粘度上昇によって流動性が悪くなり、これを流動性の高い流路内部の高温樹脂が乗越えながら次第に充填していく様子がわかる。これは一般的に射出成形機の金型内で生じるメルトフロント部のファウンテンフローであり、解析結果は妥当と判断できる。その後解析では充填終了となり、やがて金型内の流体粒子が冷却によって凝固点 130℃以下の固体状態へと変化した。今回の凝固モデルでは単に冷却のみの予測だけで、流体粒子から固体粒子への密度変化を考慮していないため固体粒子の体積収縮が生じず、保圧工程の予測やそれに伴い発生するひけなどの現象は再現できていない。充填・凝固プロセス下において、これらの重要な現象を含めたより実用性の高いシミュレーションを行うには密度変化を考慮したモデル化の開発が今後の課題である。

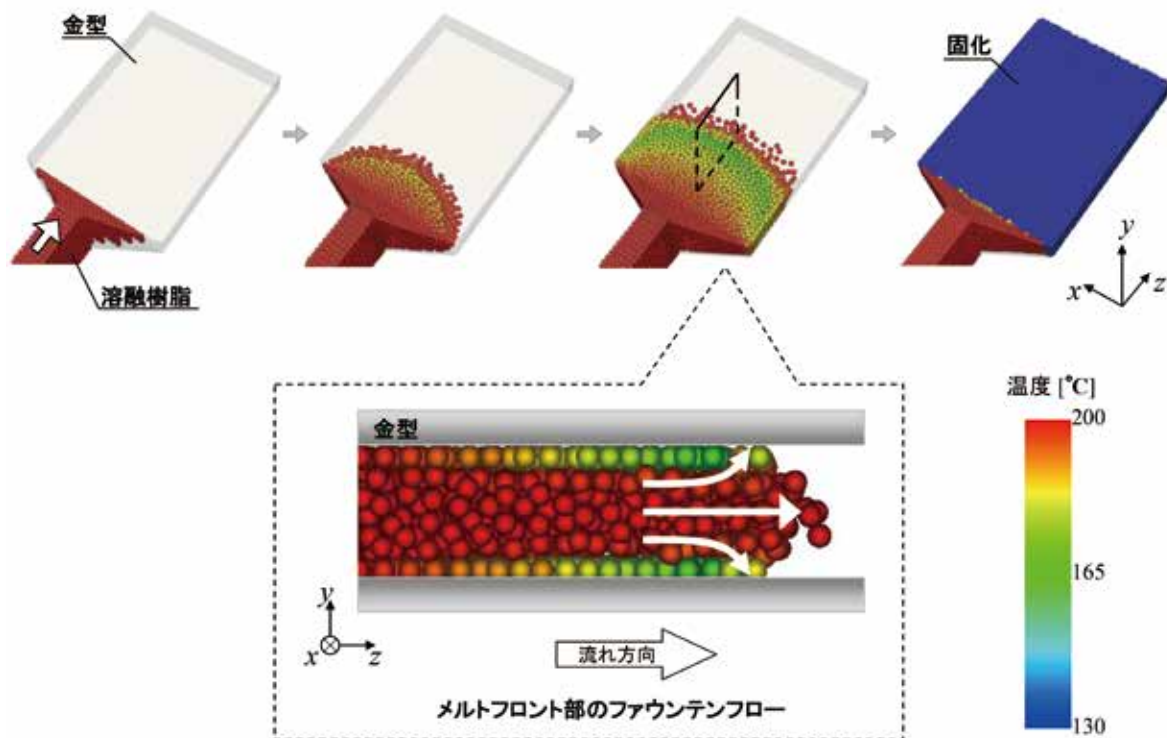



図 10　樹脂の充填挙動とファウンテンフロー

5. 結　言

本研究では、従来の MPS 法にポリゴン壁モデルを導入し、剪断発熱を加味した温度場演算機能と凝固解析機能を開発した。基礎的な検証解析と凝固プロセスの予測では妥当な結果が得られ、これらの結果を通して粒子法解析は信頼性が高い解析手法であり、プラスチック成形加工プロセスへの有用性が示唆された。今後は様々な樹脂流動現象の解明や実用展開をはかるとともに、樹脂の溶融可塑化現象や脱揮プロセス予測など更なる新機能開発を進める所存である。

参 考 文 献

(1) Koshizuka, S. and Oka, Y.: "Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid", Nucl. Sci. Eng., Vol.123 (1996), p.421-434

(2) 福澤洋平 , 富山秀樹 , 柴田和也 , 越塚誠一 : "MPS 法による高粘性非ニュートン流体解析 ", 日本製鋼所技報 , Vol.64 (2013), p.22-27

(3) 福澤洋平 , 富山秀樹 , 柴田和也 , 越塚誠一 : "MPS 法による高粘性非ニュートン流体の流動解析 ", 日本計算工学会論文集 , No 20140007 (2014)

(4) Amsden, A. A. and Harlow, F. H.: "The SMAC method, A numerical technique for calculating incompressible fluid flows", LA-4370 (1970)

(5) Sun X, Sakai M, Shibata K, Tochigi Y, Fujiwara H.: "Numerical modeling on the discharged fluid flow from a glass melter by a Lagrangian approach", Nuclear Engineering and Design, Vol.248 (2012) , p.14-21

(6) 原田隆宏 , 越塚誠一 : "SPH における壁境界計算手法の改良 ", 情報処理学会論文誌 , Vol.48, No4 (2007), p1838-1846

(7) 原田隆宏 , 越塚誠一 , 島崎克教 : "MPS 法における壁境界計算モデルの改良 ", 日本計算工学会論文集 , No 20080006 (2008)

(8) Shigeto, Y. and Sakai, M.: "Arbitrary-shaped wall boundary based on signed distance functions for granular flow simulations", Chemical Engineering Journal, Vol.231 (2013), p464-476

(9) Demirel, Y.: "Thermodynamic analysis of thermomechanical coupling in Couette flow", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.43 (2000), p.4205-4212

次世代リチウムイオン電池用革新的セパレータの実用化技術開発

Practical Use Technology Development of the Innovative Separator for Next-Generation Lithium Ion Battery

石黒　亮 *
Ryo Ishiguro

中村　諭 *
Satoru Nakamura

博士（農学） 吉岡 まり子 **
Dr. Mariko Yoshioka

博士（工学） 境　哲男 ***
Dr. Tetsuo Sakai

向井　孝志 ***
Takashi Mukai

要　旨

本研究では、優れた特性を有するセルロースナノファイバー（以下、CeNF）複合セパレータの連続的製造システムの開発を目的として、化学修飾セルロースの連続製造装置を試作し、サンプル製造実験を行った。まず、微結晶セルロース原料と無水コハク酸を二軸押出機により加熱混練反応させた。次に、生成したモノエステル化セルロース中の未反応無水コハク酸をアセトンで抽出し、抽出残渣を薄膜蒸発器により乾燥させた。この化学修飾セルロースを分散させた流動パラフィンと、超高分子量ポリエチレンを用いて、一般的な湿式法によりリチウムイオン電池用セパレータを試作した。また、このセパレータを用いて、2032 型コイン電池を試作し、電池特性を評価した。その結果、試作したセパレータは、アルミナコーティングセパレータよりも、サイクル特性及び耐熱性が優れていることが明らかとなった。さらに、試作セパレータの内部における CeNF の分散状態を TOF-SIMS、化学力顕微鏡、及び TEM により評価した結果、分散状態が優れていること及び CeNF が表面に多い傾斜構造であることが明らかとなった。

Synopsis

In this study, we have developed a continuous manufacturing system for obtaining the CeNFs (Cellulose Nanofibers) compounded separator having excellent characteristics. First, we tried to continuously produce the chemically modified cellulose. The microcrystalline cellulose material and succinic anhydride were kneading-reacted in a twin screw extruder. Next, the unreacted succinic anhydride in the mono-esterified cellulose was removed by extracting with acetone, and the purified product was dried by a thin-film evaporator. Then, we tried to make the separator for lithium-ion battery with the wet method which use the mono-esterified cellulose liquid paraffin and Ultra High Molecular Weight Polyethylene. Finally, we manufactured 2032 type LIBs equipped with the separator samples evaluated the battery characteristics. The samples were compared with the commercial separator samples. As the result, it became identified that the heat resistance and the cycle characteristics of the CeNF compounded samples were higher than those of the alumina coated separator. Furthermore, as the results of TOF-SIMS, CFM and TEM evaluations for the dispersed state of the CeNF in the CeNF compounded separator, we have found that the CeNF-dispersed state was well and the separator had the unique structure in which CeNF-concentration increased as its surface neared.

* : 広島研究所
Hiroshima Research Laboratory

** : 京都大学大学院農学研究科
Graduate School of Agriculture, Kyoto University

*** : 産業技術総合研究所
Advanced Industrial Science And Technology

1. 緒　言

近年、電気自動車やハイブリッド車などの車載用電源として、リチウムイオン電池（LIB）が搭載されている[(1)-(3)]。特に電気自動車では、長距離走行化と高出力化のため、単セルを組み合わせたモジュールを形成し、容量の増加を図っている。そのため電池の大型化による貯蔵エネルギーや電解液量の増加により、一層の安全性向上が必要とされる[(4)]。

LIBは、正極、負極、電解液と安全装置の役割を担っているセパレータの4部材で構成される。LIBの安全性を向上させるためには、セパレータの耐熱性を高めることが不可欠である。この方法として、セパレータ表面をアルミナやセラミックで塗工する方法[(5)]、異種材料の貼合せや、同一のダイスから押出して多層化する共押出法[(6)]などが提案されているが、コーターや貼合せ装置などが必要となり、コスト高になるなどの課題がある。

そこで、本研究ではセパレータの特性向上を図るために、自然界に豊富に存在し、鋼鉄の5倍以上の比強度を有する[(7)]セルロースナノファイバー（CeNF）に着目し、超高分子量ポリエチレン（UHMWPE）と複合化したCeNF複合セパレータの製造を試みた[(8)(9)]。その結果、突刺強度と耐熱性が大幅に向上したセパレータが得られた。しかし、本セパレータを製造するためには、セルロースの解繊処理やペレット製造工程が必要であり、また各工程が独立しているため、連続的に製造することが困難であった。そこで、本報では優れた特性を有するCeNF複合セパレータの連続製造装置を新規に提案し、同装置を用いて連続的に作製したセパレータの物性及び電池特性を評価したので、それらについて以下に述べる。

2. 従来法によるCeNF複合セパレータ製造方法

従来のCeNF複合セパレータ製造方法は、①セルロースの化学修飾及び解繊処理を施したCeNF水スラリー製造工程、②UHMWPEと①工程で製造した水スラリーを複合化するペレット製造工程、③CeNF複合セパレータ製造工程の3工程で構成される。

セルロースは、水素結合により凝集しやすく、また、水酸基の存在が、疎水性の樹脂との親和性を阻害する[(10)]。そこで、①工程において、セルロース微粉末と無水コハク酸を卓上混練機により反応させることで、エステル化による末端水酸基の化学修飾処理を行う[(11)]。この処理では、未反応物が残るため、アセトンによる洗浄と真空乾燥により化学修飾セルロースを得る。次いで、このセルロースを5mass%含有する水スラリーを、スターバースト装置を用いた対向衝突処理により、解繊されたCeNFが分散した水スラリーを得る。

②工程では、①工程で得た水スラリーとUHMWPEを二軸押出機中に投入し、CeNF複合ペレット得る。水スラリー中の水分は、セルロースの凝集原因となるため、本工程では、脱水工程を設けて水分量を低減する。また、脱水と混練を行う際、標準的な押出機では処理能力が不足するため、二軸押出機を2台接続するタンデム構成による処理が必要となる。

③のセパレータ製造工程では、②工程で得たCeNF複合ペレットと流動パラフィンをそれぞれ二軸押出機中で溶融・混練して相溶化させる。これをTダイより押出し、キャストロール上で冷却・固化することで、スピノーダル分解による相分離を促し、樹脂とパラフィンがナノサイズの海島構造を有するシートを成形する。これを機械方向（MD）と幅方向（TD）にそれぞれ延伸して、パラフィン部分を塩化メチレンなどの溶剤で抽出・除去することにより、微細孔を有するセパレータが得られる。

3. 連続化学修飾処理装置の開発

3.1 化学修飾処理工程の連続化の検討試験

これまでの化学修飾工程では、一度に処理可能なセルロース量が少なく、量産化システムには適さない。そこで、本検討では二軸押出機と薄膜蒸発器を用いた連続化学修飾処理装置による量産化検証実験を行った。

実験装置概要を図1に示す。まず、市販の高純度セルロース微粉末（旭化成ケミカルズ社製：Ceolus FD101）と無水コハク酸を95.5:4.5の重量比でプリブレンドし、これをフィーダーにより2.5kg/hで二軸押出機（日本製鋼所製：TEX30α）中に投入して反応させた。TEX30α先端より押出したセルロースを、アセトンにより洗浄し、送液ポンプを用いて薄膜蒸発器（旭製作所製）に注入した。

実験条件を表1に示す。化学修飾状態とシリンダ温度、滞留時間、無水コハク酸の添加量の影響を評価するために、No.1の条件を基準として、表1中の網掛部で記載したパラメータを変更した時の化学修飾度を評価した。

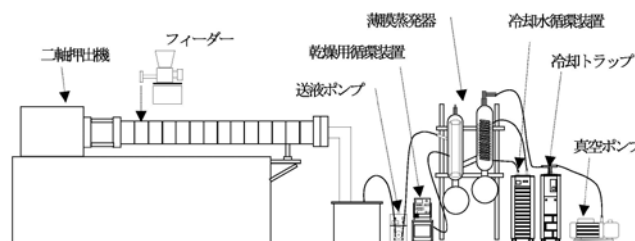



図1　化学修飾処理装置概要

セルロースの乾燥処理に用いた薄膜蒸発器の外観を図2に示す。本装置では、ワイパーの遠心力で混合液の薄膜を形成し、加熱した円筒壁面で乾燥させることで、溶液中の有機溶剤を効率的に蒸発させることができる。また、

揮発した有機溶剤は、蒸留搭により冷却し、液化した状態で回収することができる。本実験では、円筒壁面の加熱温度を110℃、ワイパーの回転速度を250rpmの条件で乾燥し、図3の状態の乾燥セルロースを得た。

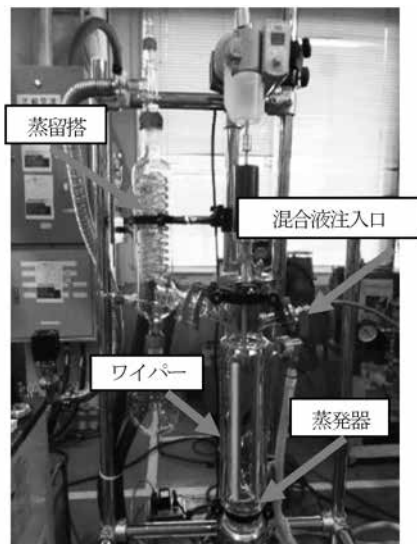



図2　薄膜蒸発器の外観

図3　薄膜蒸発器で乾燥したセルロース

3.2　化学修飾度の評価方法

評価は一般的に用いられる酸価測定法（JIS K2501）により行った。酸価は、サンプル1g中に含有される酸性物質を中和するために必要な水酸化カリウムのmg数と定義される。酸価はセルロース表面に付加された無水コハク酸の量を示しており、この値が高いほど、疎水性を有していると判断することができる。

測定では、まず100mlビーカに評価用セルロースを1g計り取り、蒸留水とアセトンを10mlずつ加えて、マグネチックスターラーにより400rpm、10分間攪拌した。次いで、この混合溶液を200rpmで攪拌した状態で、0.1NのKOH-エタノール溶液を用いて滴定し、酸価を測定した。

3.3　評価結果

実験結果を表1に併記する。基準としたNo.1の酸価は、従来のバッチ処理による酸価とほぼ同等であった。

次に、セルロースの化学修飾工程における各パラメータと酸価について比較した。その結果、添加量、シリンダ温度、滞留時間の順に酸価に対する依存性が高くなる傾向を確認した。

添加量が基準条件の3倍であるNo.4では、酸価が1.5倍以上高くなった。これは、無水コハク酸の添加量が増加したことで、セルロースとの接触頻度が増加した結果、反応が促進されたものと推測される。

シリンダ温度が基準条件より25℃低いNo.2では、酸価が半分程度になった。これは、シリンダ温度が低く、反応が促進されなかったためと推測される。

滞留時間が基準条件よりも5分短いNo.3では、酸価に大きな差は見られなかった。これは、滞留時間が7分程度で化学修飾反応が完了したためと推測される。

表1　化学修飾度の評価結果

No.	シリンダ温度 [℃]	滞留時間 [min]	無水コハク酸添加量 [%]	酸価 [mg/g]	備考
1	140	12	4.5	36.6	基準
2	115	12	4.5	17.6	シリンダ温度低下
3	140	7	4.5	35.7	滞留時間短縮
4	140	12	13.5	59.5	添加量3倍
バッチ	−	−	−	38.5	

4.　CeNF複合セパレータの連続製造

4.1　CeNF複合セパレータ製造装置概要

前述のように、従来のCeNF複合セパレータは、3段階の工程で製造を行っていた。そこで、この工程を簡略化するため、化学修飾工程後のセルロースを流動パラフィン中に直接添加したCeNF分散流動パラフィンを作製して、実験に用いた。

本実験の装置概要を図4に示す。実験では、重量式フィーダ（日本製鋼所製：STF25）を用いて、UHMWPE（三井化学社製：ハイゼックスミリオン030S）を二軸押出機内（日本製鋼所製：TEX30α）に3kg/hで投入した。また、前工程で製造した化学修飾セルロースを分散させた流動パラフィン（モレスコ社製：P-350P）を液添ポンプ（タクミナ社製：PLSXPA3-014-STS-UVX）を用いて、二軸押出機内へ圧入した。なお、樹脂と流動パラフィンは3：7の重量比とした。

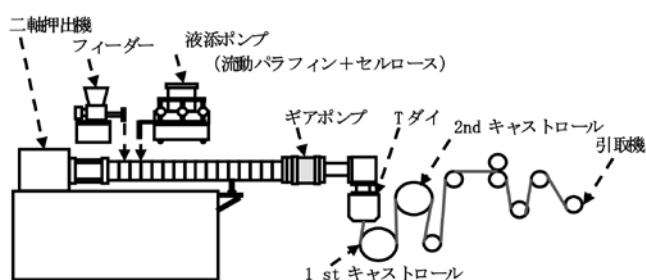
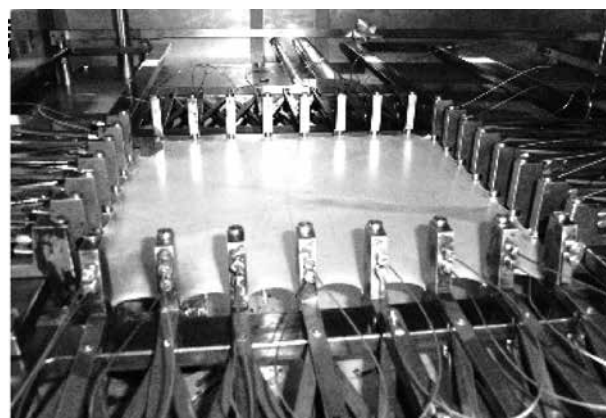



図4　シート成形装置構成

4.2　使用原料及びセパレータサンプル製造条件

実験条件を表2に示す。本実験では、酸価が異なる2種類のセルロースを添加して作製したセパレータを、未添加の場合と比較した。さらに、本実験では、酸価が36.6 mg/gのセルロースを用いて、添加量を0.5mass%～1.5 mass%と変更したセパレータも製造し、セパレータ特性への影響を評価した。

表2　使用原料比とCeNF添加量

No.	PE	流動パラフィン	CeNF	酸価
	[mass%]	[mass%]	[mass%]	[mg/g]
1	30	70	0	−
2			1	59.5
3			1	36.6
4			0.5	
5			1.5	

シート成形条件及び延伸条件を表3に示す。前述の原料をTEX30αにより溶融・混練し、Tダイよりシート状に押出した。このシートをキャストロール上で冷却し、厚さ1mmのCeNF複合セパレータ原反を得た。

表3　シート成形条件及び延伸条件

キャスト工程			延伸工程（テーブルテンタ）		
押出量	シリンダ温度	ロール温度	MD倍率	TD倍率	温度
[kg/h]	[℃]	[℃]	[倍]	[倍]	[℃]
10	180	30	6	7	110

次いで、この原反を図5に示すテーブルテンタ（東洋精機社製）により、延伸温度110℃、延伸倍率をMD6倍、TD7倍としてフィルム化した。次に、フィルム中のパラフィンを除去するため、図6に示す金枠に固定し、ジクロロメタン中に浸漬して脱脂した。さらに、金枠に固定した状態で、130℃、10分間の熱固定を施した。

図5　卓上延伸装置

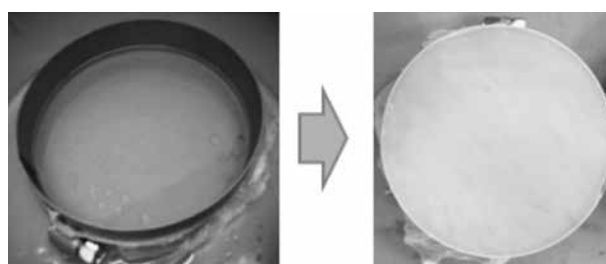



図6　セパレータ簡易脱脂状況

4.3　CeNF複合セパレータの評価方法

表4に作製したセパレータの特性評価項目及び評価装置概要を示す。評価項目のうち、厚み依存性が有るガーレ値、突刺強度は、厚さを25μmに換算し、各測定値に掛けた換算値を評価に用いた。なお、ガーレ値とは、100mlの空気がフィルムを通過するまでの秒数を示しており、JIS P8117に定義される。

表4　特性評価項目と測定方法

測定項目	測定装置	メーカー
表面観察	FE-SEM	CarlZeiss社製:SUPRA55VP
孔径サイズ 空孔率	ポロシメータ	カンタクローム製:オートポアⅣ9520形
ガーレ値	ガーレ式自動計測機	TESTING MACHINES INC社製:58-03-01キット
突刺強度	突刺強度計	カトーテック社製:KES-FB3-AUTO
引張強さ	オートグラフ	島津製作所製:AG-I 20KN
熱収縮	加熱炉	−
CeNF分散状態評価	TOF-SIMS	ULVAC-PHI社製:TRIFT nano TOF型
	化学力顕微鏡	SIIナノテクノロジー社製:E-sweep
	透過電子顕微鏡（TEM）	日本電子製:JEM-2010型

また、作製したセパレータは、産業総合技術研究所関西センターユビキタス研究部門電池システム研究グループにおいて電池特性を評価した。評価試験では、図7に示す構造の2032型のボタン電池を作製し、正極にはコバルト酸リチウム（$LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$）、負極にはグラファイトをそれぞれ用いた。セパレータは、両電極間を絶縁す

るように配置した。さらに電解液には六フッ化リン酸リチウム（$LiPF_6$）を用いた。表5に電極組成と電池構成を示す。電池評価試験では、高温耐久性評価試験とサイクル寿命特性試験を行った。

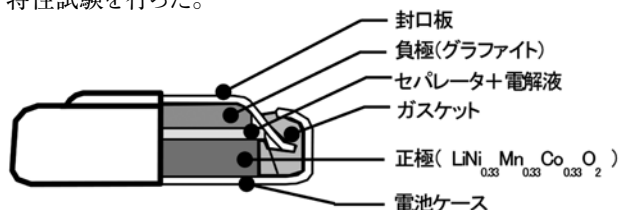



図7　2032型ボタン電池断面構造

表5　電池組成及び構成

電極組成	正極	$LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$：導電助剤：水系バインダ 90：5：5 mass%
	負極	グラファイト：導電助剤：水系バインダ 93.5：2.5：4 mass%
電池の構成		グラファイト/3元系セル 電池容量：1.5mAh/cell N/P＝1.13（正極1.5mAh/cm²、負極1.7mAh/cm²） 電解液：$LiPF_6$　1mol/L（EC：DEC＝50：50vol.%）＋VC　1masst%

高温耐久性評価試験のフローを図8(i)に示す。本評価試験では、まず、4.6Vまで充電したGraphite/3元系リチウムイオン電池を、30℃～140℃の所定温度に加熱して、1時間放置した。この電池を常温まで冷却した後、0.2Cで放電し、3Vまで放電した時の電池容量を測定した。

サイクル特性評価試験のフローを図8(ii)に示す。本評価試験では、高温放置試験と同条件で充電した3元系リチウムイオン電池を、60℃に加熱して3Vまで放電した時の電池容量を測定した。放電レート（C値）は、80サイクルまで0.2C、それ以降を0.5Cとした。また充放電を200回繰り返し、各サイクルでの電池容量を測定した。なお、放電レートは、任意の容量の電池をどの程度の速さで放電するかを示した値であり、1Cとは1時間で放電が完了することを示す。評価には、アルミナ塗工セパレータ、CeNF複合セパレータ、UHMWPE単体セパレータの3種類を用いた。なお、UHMWPE単体セパレータのPE原料にはUHMWPEをプリブレンドした原料（三井化学社製：ハイゼックスミリオン030Sとハイゼックスミリオン145M）を用い、CeNF複合化セパレータよりも、分子量が1.6倍高いものを用いた。また、アルミナ塗工セパレータは基材に市販のポリプロピレン（PP）を原料とした乾式セパレータに、市販のアルミナ系塗工液をグラビアコータで塗工したセパレータを用いた。

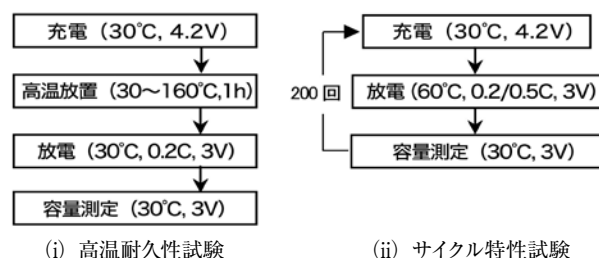
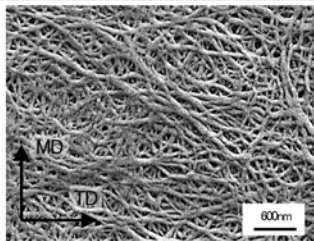
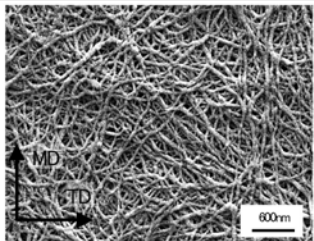
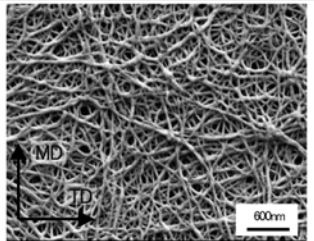



図8　電池評価試験フロー

4.4　セパレータ特性評価結果

4.4.1　CeNFの添加量の酸価依存性

UHMWPE単体のセパレータ及び、酸価が異なるセルロースを用いたセパレータの特性評価結果を表6に示す。まず、CeNF複合セパレータはUHMWPE単体のセパレータと比較して、セパレータ特性が大幅に向上した。

また、SEM観察結果より、UHMWPE単体のセパレータ表面に形成されている微細孔の一部に、溶融により閉塞した箇所が見られた。一方、CeNF複合セパレータには、このような表面状態は観察されず、微細孔が均一に形成されていた。

次に、酸価が1.5倍以上高いCeNFを用いた場合、セパレータ特性が更に向上することが明らかとなった。このセパレータは、UHMWPE単体のセパレータと比較して、突刺強度が1.3倍高く、熱収縮率も1/2以上低減されているため、LIBの安全性を更に向上できると考えられる。

表6　UHMWPE単体及び酸価の異なるCeNFを用いたセパレータ特性評価結果

評価項目	UHMWPE単体	CeNF複合化（酸価36.6mg/g）	CeNF複合化（酸価59.5mg/g）
SEM像	MD TD 600nm	MD TD 600nm	MD TD 600nm
厚さ [μm]	9.6	8.9	8.2
空孔率 [%]	39.3	49.1	51.9
ガーレ値 [sec/100ml]	1148	561	504
突刺強度 [gf]	782	987	1081
引張強さ [MPa]	145（MD）135（TD）	178（MD）183（TD）	189（MD）210（TD）
120℃熱収縮率 [%]	25（MD） 27（TD）	13（MD） 16（TD）	11（MD） 12（TD）

4.4.2 CeNF添加量によるセパレータ特性の影響

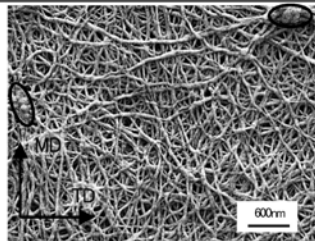
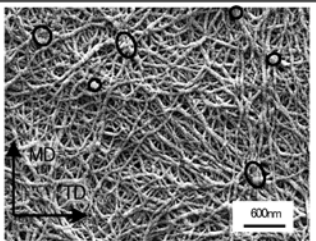
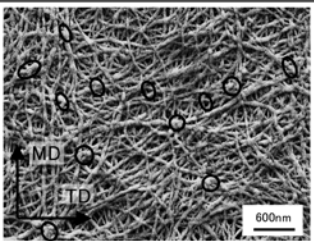
酸価が36.6mg/gのCeNFを用いて、添加量を変更したセパレータの特性評価結果を表7に示す。CeNFの添加量を0.5mass%から1mass%に増加した場合、セパレータ特性の向上が見られた。しかし、CeNF添加量を1mass%から1.5mass%に増加した場合、セパレータ特性は低下した。特に、CeNF添加量が1.5mass%の場合、引張強さが大きく低下した。SEM観察結果より、CeNFの添加量が0.5mass%と1mass%の場合、セパレータに形成されている微細孔は均一であるが、添加量が1.5mass%の場合、微細孔が不均一であった。また、表7中の丸枠で示す様にCeNFの添加量が増加すると、セパレータ表面に、塊状の結晶が多く見られた。

上記の結果より、CeNFの添加量を増加することにより、セパレータ特性は向上するが、添加量が1mass%以上になると、CeNFの分散状態が不均一となり、特性が低下すると考えられる。しかし、4.5.1の結果より、CeNFの酸価が高いほど、セパレータの分散性が向上し、特性を向上できることが示唆されたことから、高い酸価のCeNFを用いることで、CeNFの添加量を増加することが可能となり、セパレータ特性の更なる向上が期待される。

4.5 セパレータ特性に関する考察

本実験条件において、CeNF複合セパレータは、UHMWPE単体の場合と比較して、ガーレ値及び空孔率が向上した。UHMWPE単体のセパレータのガーレ値の悪化は、今回の製造条件では熱固定温度が高く、結晶が溶融して微細孔が閉塞したことが原因と推察される。一方、CeNF複合セパレータは、CeNFと樹脂が複合したことで融点が高くなり[12]、結晶が溶融しなかったため、同じ温度においても微細孔の閉塞が生じなかったものと考えられる。

CeNF添加量が1.5%と増加した場合のSEM観察結果より、塊状の構造と微細孔の閉塞が確認された。この塊状の部位をEDXで評価すると、周囲と比較して酸素濃度が10倍以上高いため、CeNFが偏在していると推定される。また、この塊状の部位は、添加量が1%以下のサンプルでは、ほぼ見られないため、添加量による影響と考えられる。この塊状の部位は、樹脂とは異なり延伸配向しないため、微細孔の形成不良の原因となったと推察される。

酸価が高いCeNFを用いた場合、セパレータ特性が大幅に向上した。これは、化学修飾によりセルロースの表面状態が疎水性に変化したことで、樹脂中において分散性が向上したためと推察される。

4.6 セパレータ中におけるCeNF分散状態評価

CeNF複合サンプルはいずれもセパレータ特性の向上が認められ、CeNFと樹脂の複合化したことによる効果と推察された。しかし、セパレータ中におけるCeNFの添加量は、1mass%と非常に少なく、通常の測定手法では分散状態を評価することが困難であった。そこで、セパレータ中におけるCeNFの分散状態を明らかにするため、CeNF添加量を2mass%および3mass%としたサンプルを卓上混練機で200℃、10分間混練して作製した。その後、プレス機を用いて厚さ1mmの原反を得た。原料及び延伸方法は、4.1及び4.2に準じ、酸価が36.6のCeNFを使用した。

4.6.1 TOF-SIMSによるCeNF分散状態評価

セパレータ表面の分散状態をTOF-SIMS（ULVAC-PHI社製：TRIFT nano TOF型）により評価した。本測定では、セルロース中に存在し、ポリマー中には存在しない酸素原子の分散状態を評価した。各試料表面の2次イオン質量スペクトルを図9に示す。図中の点は、酸素が検出された部位を示す。CeNF添加量が2mass%のサンプルは一部に偏在が観察されるが、比較的均一に酸素がマッピング

表7 CeNF添加量を変更したセパレータの特性評価結果

評価項目	CeNF添加量0.5mass%	CeNF添加量1mass%	CeNF添加量1.5mass%
SEM像	MD / TD / 600nm	MD / TD / 600nm	MD / TD / 600nm
厚さ [μm]	9.0	8.9	9.5
空孔率 [%]	48.2	49.1	47.9
ガーレ値 [sec/100ml]	571	561	586
突刺強度 [mN]	989	987	862
引張強さ [MPa]	162（MD）177（TD）	178（MD）182（TD）	150（MD）155（TD）
120℃熱収縮率 [%]	14（MD） 17（TD）	13（MD） 16（TD）	21（MD） 23（TD）

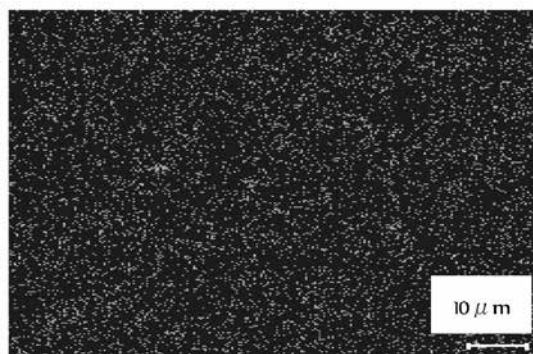
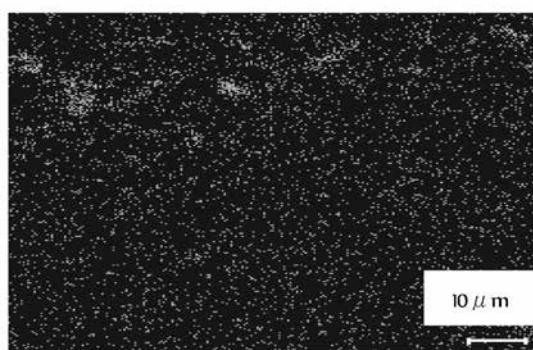
されている。一方、3mass% のサンプルでは酸素マッピングに多くの偏在が確認された。添加量が増加した場合における分散状態の悪化は、4.5 で明らかとなっており、今回の酸素マッピングの結果は、その傾向と一致する。したがって、この結果より、酸素マッピングを行うことで、セパレータ表面における CeNF の分散状態を評価できることが示唆された。

(i) 2 mass%添加量サンプル

(ii) 3 mass%添加量サンプル

図 9　サンプル表面の酸素マッピング結果

4.6.2　化学力顕微鏡による CeNF の複合化状態評価

作製したセパレータ表面における CeNF の複合化状態を評価するために、化学力顕微鏡（SII 社製：E-sweep）を用いた分析を行った。化学力顕微鏡では、水酸基で修飾した探針と試料表面間の分子との反発力が摩擦力として検出される。そのため、水酸基密度の高い CeNF 部では反発力が大きくなり、摩擦力が増加する。

化学力顕微鏡の測定では、表面に水酸基を化学修飾したカンチレバー（オリンパス株式会社製：Si_3N_4 製両面 Au コート）を用い、真空下で行った。カンチレバーの走査方向を TD と平行として、試料表面の高さと摩擦力を測定し、CeNF 添加の有無による表面状態の差異を評価した。

両サンプルの摩擦力像を図 10 に示す。同図において白く表示されている部位は、摩擦力が大きいことを示す。UHMWPE 単体のセパレータの表面は、一部に摩擦力が大きい箇所が見られるが、それ以外の部位では摩擦力に大きな差は見られなかった。一方、CeNF 複合セパレータには、周囲よりも摩擦力が大きく、水酸基との反発が強い部位があることが確認された。この部位には、太さ 10 ～ 100 nm 程度の MD に整列した結晶繊維が確認された。この結晶繊維は、一般的な CeNF を複数本束ねた繊維径とほぼ一致するため、試作したセパレータ中には、樹脂と解繊された CeNF が複合化した状態で存在していることが示唆された。

次に、化学力顕微鏡により得られた、試料表面の高さ測定結果を図 11 に示す。この表面高さは、図 10 の AB 線分上を走査することで得た。UHMWPE 単体のセパレータ表面には、異物と推定される特異点は見られるが、高さはほぼ均一であった。一方、CeNF 複合セパレータでは、高さが大きく変化しており、この凸部が PE 繊維と複合化された CeNF 繊維であると推定される。

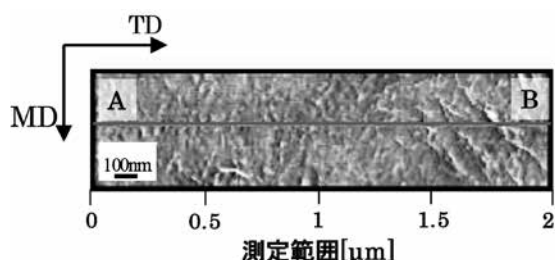
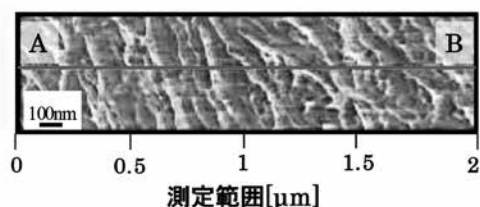
化学力顕微鏡を用いた観察結果より、CeNF 複合セパレータの表面には、CeNF が存在し特性向上に寄与していることが示唆された。

(i) UHMWPE 単体セパレータ

(ii) CeNF 複合セパレータ

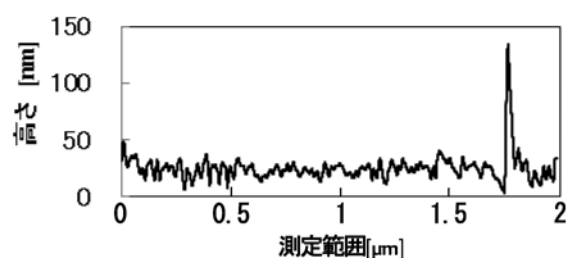
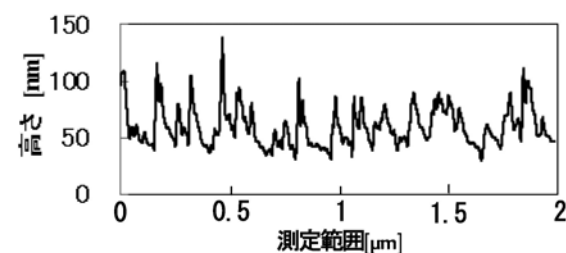
図 10　摩擦像観察結果

(i) UHMWPE 単体セパレータ

(ii) CeNF 複合セパレータ

図 11　各サンプル表面の高さ像

4.6.3　セパレータ内部における CeNF 分散状態

セパレータ内部における CeNF の分散状態を評価するために、TEM（日本電子製：JEM-2010 型）による観察を行った。まず、資料中央のサンプルを切り出し、エポキシ樹脂で包埋し、ミクロトーム（ライカ社製：ULTRACUTS）を用いて、薄片を作製した。この薄片中の CeNF を四酸化ルテニウムで染色した。この試料の断面を TEM により観察した。なお、サンプルは TD の延伸倍率が大きく、MD よりも配向していると考え、TD 断面を観察した。

TEM の観察結果を図 12 に示す。図中の丸で囲んだ範囲は、CeNF が染色された部位を示している。観察結果より、CeNF 複合セパレータの表層（A 点）には CeNF が多く、内部（B 点）には少ない傾斜構造が確認された。一般的に複合材料では、樹脂中に繊維が均一に分散している程、機械強度が向上することが知られている[13]。そのため、CeNF 複合セパレータ中における CeNF の分散状態を均一にすることで、さらに特性を向上することができる可能性が示唆された。

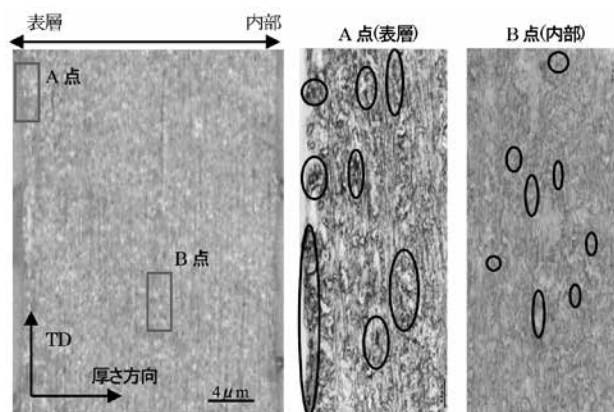



図 12　TEM 観察結果

4.7　電池の安全性評価

4.7.1　高温耐久性評価試験結果と考察

セパレータの違いによる電池の耐熱性を比較するため、表 6 で示した UHMWPE 単体サンプル、CeNF 複合サンプルと、市販の乾式セパレータに市販のアルミナ系塗工液をグラビアコータで塗工したサンプルを用いた電池をそれぞれ試作し、高温耐久性試験を行った。結果を図 13（ⅰ）(ⅱ)(ⅲ) に示す。本試験では、電池を 60 ℃～ 140 ℃までの高温で 1 時間放置した後、30℃で電池容量を測定した。60℃で放置後の充放電容量を基準として、各温度で放置した後 3V まで放電した時の充放電容量を比較すると、UHMWPE 単体セパレータを用いた場合では、130℃では約 40 % 低下した。60℃における電池充放電容量 140mAh/g から、3V 放電時の充放電容量である 110mAh/g（充放電容量維持率が 80% 以下）となった場合が使用限界であると仮定すると、UHMWPE 単体のセパレータは 120℃、アルミナ塗工セパレータは 130℃で使用限界となったが、CeNF 複合セパレータでは 140℃でも 90% に近い充放電容量が維持された。従って、CeNF 複合セパレータの耐熱温度は、UHMWPE 単体のセパレータより 20℃以上、アルミナ塗工セパレータより 10℃以上向上しており、短絡や過充電により電池が高温となった場合でも、安全性を維持できる可能性が示された。また、アルミナを塗工したセパレータを用いた場合、図 13（ⅱ）で示したように非常に多くの微小短絡が確認されたが、CeNF 複合セパレータ用いた場合、微小短絡も発生しなかった。

UHMWPE 単体セパレータを用いた場合、130 ℃において電池容量が急激に低下したのは、PE の融点が 130 ℃近傍であるため、セパレータが溶融したことで、電極表面の活物質が溶融したセパレータ中に埋没した結果であると推察される。一方、CeNF 複合セパレータは、CeNF と樹脂の複合化による耐熱性向上と補強効果により、セパレータの突刺強度が向上したため、電池が高温になった場合でも、活物質が埋没せずに、電池機能が維持されたものと推察される。

同様に、アルミナ塗工セパレータを用いた場合に発生した微小短絡も、基材の耐熱性が影響していると推察される。このセパレータは、PP 原料のセパレータ表面に耐熱性の高いアルミナ粒子を塗布しているため、基材の融点は 160℃近傍であるが、電池が高温となると、基材が軟化してアルミナ粒子が局部的に埋没、または剥離することで、抵抗値の低い部分が生じ、そこに電荷が集中した結果、微小短絡が発生したなどの原因が考えられる。

以上から、CeNF 複合セパレータは、一般的に耐熱性に優れるとされるポリプロピレン基材を用いたアルミナ塗工セパレータよりも耐熱温度が向上し、過充電や短絡などにより電池が高温となった場合においても、安全性を維持できることが示された。

4.7.2　サイクル特性評価結果と考察

60℃で放電を行った場合のサイクル特性評価試験結果を図 14 に示す。同じ充放電条件で行った 200 サイクル後の充放電容量維持率は、CeNF 複合セパレータを用いた場合、UHMWPE 単体セパレータの約 2.2 倍、アルミナ塗工セパレータの約 1.4 倍であった。これは、樹脂と CeNF が複合化したことで、セパレータの耐熱性、強度特性が向上し、長寿命化に繋がったと推察される。

また、アルミナ塗工セパレータは、UHMWPE 単体のセパレータと同程度の耐久性であった。セパレータ表面にアルミナ層を塗工することで、セパレータの耐熱性を大きく向上できる。一方、アルミナ塗工層は、電極間の電位に曝されることで、バインダなどが分解し、生成物が発生することも予想される[14]。この電解液や電極バインダ等の分解による劣化で、電池サイクル特性が低下したものと推定される。

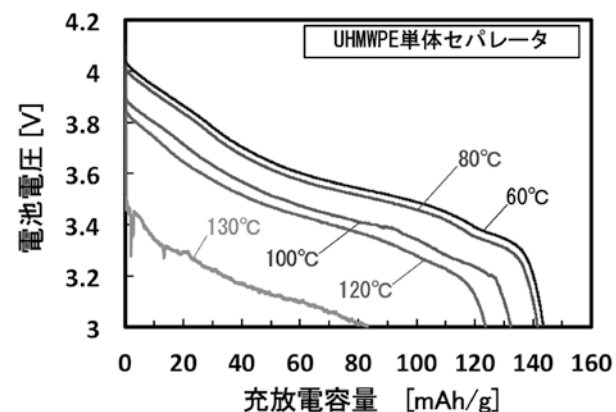
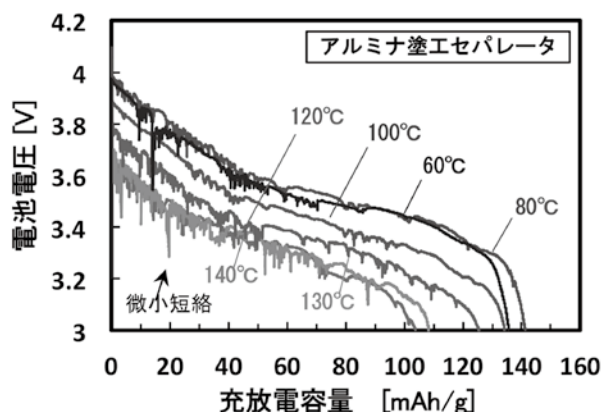
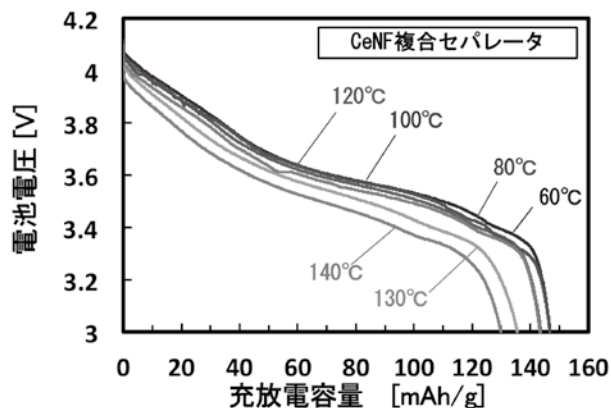



図 13　高温耐久性評価結果

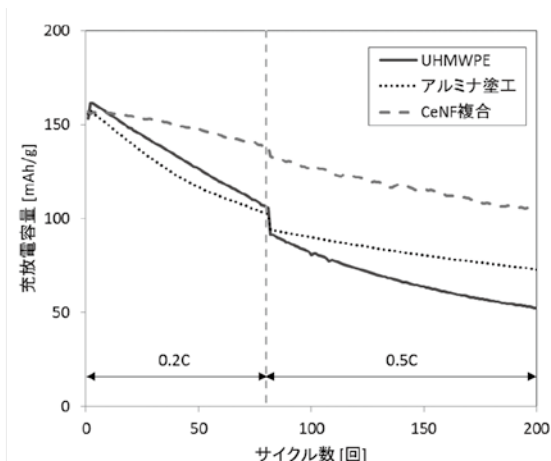



図 14　サイクル特性評価試験結果

5. 結　　言

優れた特性を有する CeNF 複合セパレータの連続製造システムを開発した。このシステムによりセパレータを製造し、セパレータ特性と電池特性について評価した。その結果、以下の結論を得た。

①化学修飾工程において薄膜蒸発器を用いることで、未反応物の洗浄及び乾燥処理を連続的に行うシステムを構築した。

②化学修飾条件の探索を行い、化学修飾状態を酸価で評価した結果、無水コハク酸の添加量と反応温度による影響が大きいことが明らかとなった。

③酸価が異なる 2 種類の CeNF を用いてセパレータを製造した結果、高い酸価の CeNF を用いた方がセパレータ特性は向上した。酸価が高い程、CeNF の疎水性が高いことを示すため、樹脂中での解繊と分散状態が向上した結果、セパレータ特性が向上したと推察される。

④ CeNF 複合セパレータ表層に CeNF が多く存在し、内部に少ない傾斜構造を有していることが知られた。

⑤ CeNF 複合セパレータを用いて 2032 型ボタン電池を作製し、サイクル特性と高温耐久性評価試験を行った。その結果、CeNF 複合セパレータは、UHMWPE 単体のセパレータよりも、耐熱温度が 20℃以上向上し、200 サイクル後の電池容量維持率が約 2.2 倍高くなった。

⑥ CeNF 複合セパレータは、一般的に耐熱性が高いといわれるアルミナ塗工セパレータよりも、耐熱温度が 10℃以上向上し、200 サイクル後の電池容量維持率が約 1.4 倍高くなった。

参　考　文　献

(1)　並木文博：日立評論 Vol.95 No.11 (2013) p.758-762

(2)　矢野経済研究所. リチウムイオン電池部材市場の現状と将来展望 CMEO 事業部, (2010), p.42-52

(3)　高橋昌志：自動車研究 32-6 (2010) p.10-12

(4)　斎藤英彰：NEC 技報 Vol.65 No.1 (2012) p.53-56

(5)　西美緒：日本学術振興会協力会 No.104 (2011) p.14-26

(6)　シーエムシー出版 , 有機絶縁材料の最先端 (2007) p.85

(7)　矢野浩之 . 第 62 回日本木材学会大会研究発表要旨集 , Vol.62 (2012)

(8)　中村諭 , 串崎義幸 , 石黒亮 , 兜森俊樹 , 吉岡まり子 , 向井孝志 , 境哲男 , 辻岡則夫：電気化学会創立 80 周年記念大会要旨集 (2013), p.151

(9)　石黒亮 , 中村諭 , 串崎義幸 , 兜森俊樹 , 吉岡まり子 , 向井孝志 , 境哲男 , 辻岡則夫：成形加工'13(2013) p.87-88

(10)　技術情報協会 , セルロースナノファイバーの調製、分散・複合化と製品応用 第 7 章 (2015)

(11)　Yoshioka M, Nishio Y, Nakamura S, Kushizaki Y, Ishiguro R, Kabutomori T, Imanishi T, Shiraish N (2013) Cellulose Nanofibers and Its Applications for Resin Reinforcements (Chapter 14), in "Cellulose − Fundamental Aspects", Edited by Theo van de Ven and Louis Godbout, p.343-366, InTech, Croatia, 2013.

(12)　中村諭 , 石黒亮 , 串崎義幸 , 兜森俊樹 , 吉岡まり子 , 向井孝志 , 境哲男：日本製鋼所技報 ,Vol.64 (2013), p.28-35

(13)　フロンティア出版 , ポリマー系ナノコンポジットの製品開発 (2004), p.101-109

(14)　増田敬生, 国際公開番号 WO2013/176276A1 (2013.11.28)

(謝辞)

本研究は科学技術振興機構 (JST) における研究成果最適展開支援プログラム (A − STEP 探索タイプ　シーズ顕在化　ハイリスク挑戦タイプ) の助成を受けて実施されたものであり、ここに謝意を表します。

YBCO 薄膜を用いた超伝導フィルタの開発
Development of the Superconducting Filter with a YBCO Thin Film

佐藤　庸夫 *　Yasuo Sato
北田　典敬 *　Noritaka Kitada
岸田　和人 **　Kazuhito Kishida
寺尾　勝廣 **　Katsuhiro Terao

要　　旨

スマートフォンやタブレットおよびクラウド・サービス等の利用の拡大により、モバイルならびにデータ通信が爆発的に増大し、無線周波数資源およびデータ・トラフィック容量が逼迫してきた。それ故、周波数資源の有効利用のみならず高速・大容量通信能力を備えたデータ・トラフィックシステムが緊急に要望されている。

高速・大容量通信を実現する方式としてキャリアアグリゲーション技術が提案されてきた。この方式のための要素デバイスは、一つのフィルター・デバイスで二つのバンド周波数を通過させるデュアルバンドパス・フィルター（DBPF）である。特に、高温超伝導体（HTS）を用いた DBPF は、常伝導フィルタよりも低い挿入損失、急峻な遮断エッジ、大きな帯域外減衰が得られる。それは、高速・大容量通信および周波数資源の有効利用を実現することが同時に期待できる唯一の物理的デバイスである。我々は、当社が開発した ELAMOD 法（Excimer Laser Assisted Metal Organic Deposition 法：エキシマレーザアシスト塗布熱分解法）を適用して YBCO 薄膜の HTS を使用した DBPF を製作しテストを行った。

本報では超伝導理論に基づき HTS を用いた DBPF の概念と期待効果について述べた後に、YBCO 薄膜の評価、さらに HTS 薄膜を用いた 2 種類の DBPF の特性について報告する。

―― Synopsis ――

The expanded use of smartphones, tablets and cloud services have brought about an explosive increase in mobile and data communications, resulting in lacks of both radio frequency resources and capacity of data traffic. Therefore not only the effective use of frequency resources but also the data traffic systems with high-speed/high-capacity communication capabilities are urgently required.

Carrier aggregation technology has been proposed as a method to realize high-speed/high-capacity communication. An elemental device for the method is the dual-band bandpass filter (DBPF) which enables dual-band frequencies to pass in a single filter device. In particular, a DBPF utilizing a high temperature superconductor (HTS) has lower insertion loss, large band-edge steepness and higher out-of-band attenuation than normal conducting filters. It is the only physical device anticipated for the concurrent realization of both high-speed/high-capacity communications and the effective use of frequency resources. We fabricated and tested DBPFs utilizing HTS of YBCO thin films prepared by ELAMOD (Excimer Laser Assisted Metal Organic Deposition) method which was developed by JSW.

In this paper, we describe the concept of HTS DBPF and its anticipated effects according to the superconductivity theories, then, the evaluation of YBCO thin films and the test results on the characteristics of two types of the DBPF utilizing HTS film are reported.

* : 横浜研究所
Yokohama Research Laboratory
** : 研究開発本部
Research & Development Headquarters

1. はじめに

移動体通信においては、スマートフォンやタブレット等の増加、高画質・高品質化およびクラウド化等により、東京オリンピックなどの集中的なイベントにおいては局所的な通信トラフィックの爆発が予測されている。これに対応するために、高速・大容量通信と周波数の有効利用が世界的な課題とされている。

高速・大容量通信を実現する方法は帯域幅を広げることであるが、周波数資源が逼迫している現在、連続した大きな周波数帯域を確保することは困難である。この問題の解決策として、分散した複数の周波数帯域を束ねて同時に使用することで実質的に広い帯域幅の運用を可能とするキャリアアグリゲーション技術が提案されてきた。これを物理的に実現するデバイスは二つの周波数帯域を同時に通過させるデュアルバンド・フィルタ（DBPF）である。超伝導薄膜を利用した超伝導フィルタは、このデバイスを実現できる理想的な特性をそなえ、他の常伝導フィルタを圧倒的に凌駕する。

当社では超伝導YBCO薄膜を単結晶基板上に成膜する技術の開発を進め、従来のMOD法に当社の保有するELA技術でレーザ照射するELAMOD法（Excimer Laser Assisted Metal Organic Deposition法：エキシマレーザアシスト塗布熱分解法）を開発した[1)]。我々はこの手法を用いて、r面サファイア基板上に膜厚300nmの超伝導YBCOを成膜し、臨界電流密度が2.0MA/cm^{2}を超える超伝導薄膜を開発した。本報ではELAMOD法により成膜した超伝導薄膜基板を移動体通信基地局用のDBPFに加工し、その周波数特性評価を行った。そこで明らかとなった基礎的な物性と電気特性について以下に報告する。

2. 超伝導理論概要

マイクロ波無線通信用超伝導フィルタ（以下超伝導フィルタ）開発に先だって、当社超伝導YBCO薄膜基板の性能評価が求められた。超伝導物質は超伝導状態が壊れて（quenchという）常伝導へ転移するときに、臨界磁場Hc、臨界温度Tc、臨界電流密度Jcの三つの臨界値が存在する。この分野の先駆者達はこの臨界値を上げる研究を続けると同時に超伝導理論を発展させてきた。超伝導フィルタの基板材料としての性能評価を目的として、当社超伝導YBCO薄膜の臨界値に対して超伝導理論を適用して薄膜特性を予測解析した。

2.1 ロンドン理論

1911年にオネス（Onnes）は水銀が約4.2Kで突然電気抵抗がなくなること（完全導電性）を発見し、これを超伝導と命名した。1933年にマイスナー（Meißner）とオクセンフェルト（Ochsenfeld）によって超伝導体が完全反磁性を持つことが発見される。この効果はマイスナー効果と呼ばれ、完全導電性とともに超伝導体を特徴付ける現象である。この効果は1935年にロンドン兄弟（Fritz and Heinz London）によって導きだされたロンドン理論によって現象論的に説明された。ロンドン理論によると超伝導体に侵入する磁場Bは、表面磁場をB_0として式（1）で表される。λ_Lは絶対温度Tにおけるロンドンの磁場侵入長と呼ばれ、絶対零度に対するλ_0は式（2）で与えられる[2)]。またλ_Lとλ_0との関係は後にGL理論によって式（3）で与えられた。図1に模式的に磁場侵入長λ_Lを示す。

$$B(x) = B_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda_L}\right) \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{m_s}{\mu_0 n_{s0} q_s^2}} \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\left(\frac{\lambda_L}{\lambda_0}\right)^2 = \left[1-\left(\frac{T}{T_c}\right)^4\right]^{-1} \quad \cdots\cdots(3)$$

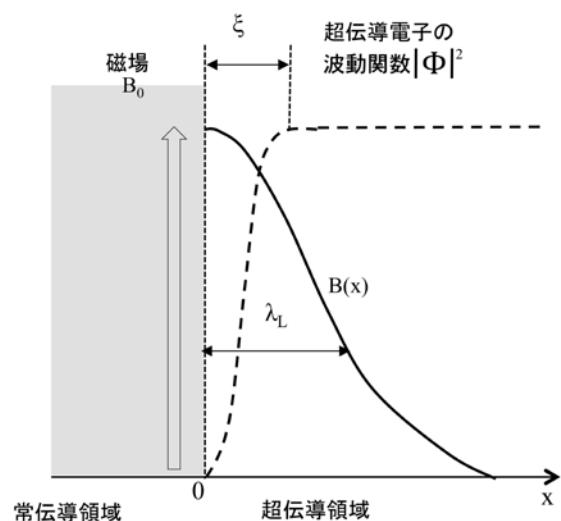



図1　磁場侵入長λ_Lとコヒーレンス長ξ

式（2）においてm_s, q_sは超伝導電子の質量、電荷であり、n_{s0}は絶対零度における超伝導電子数密度である。またμ_0は真空の透磁率である。後にBCS理論で解明されるように、超伝導電子はクーパー対電子と呼ばれ、常伝導電子の質量、電荷をm_e, eとして、$m_s=2m_e$, $q_s=2e$, とされる。n_{s0}は通常の金属よりも2桁程小さくn_{s0}=2～5E+27m^{-3}の数値が用いられる。m_e=9.1094E-31kg, e=1.6022E-19C, μ_0=1.2566E-6H/mこれら数値を式（2）に代入して、λ_0=53～84nmとなる。

式（3）においてT_cは超伝導体の臨界温度であり、こ

れを超えるとき超伝導状態は破壊され、常伝導に移行する。後述する第二種超伝導 YBCO 薄膜に属する当社製造 YBCO 薄膜では T_c=91K 程度であり、通常に使用される温度 T=70K においては、式 (3) から λ_L = 66 ～ 104nm となる。

2.2　ギンツブルグ・ランダウ理論 (GL 理論)

1950 年にギンツブルグ (Ginzburg) とランダウ (Landau) は熱力学的相転移理論を常伝導／超伝導転移に適用して超伝導現象を説明するギンツブルグ・ランダウ理論 (GL 理論) を導出した。GL 理論ではロンドン磁場侵入長の他にもう一つ超伝導の特性長を示すパラメーターとしてコヒーレンス長 ξ と呼ばれるパラメーターを導入した。コヒーレンス長 ξ は式 (4) で示される [3]。ξ は超伝導電子対の波動関数 $|\Phi|^2$ の広がりの大きさを示すものであり、ξ 程度の距離にわたって電子対が相互作用できる空間的な範囲を表す。図 1 に模式的にコヒーレンス長 ξ と超伝導電子の波動関数 $|\Phi|^2$ の概念を示す。

$$\xi = \sqrt{\frac{n_s \eta^2}{2m_s|\alpha|}} \quad \cdots\cdots (4)$$

$$\alpha = -\mu_0 H_c^2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 \quad \cdots\cdots (5)$$

$$H_c = \sqrt{H_{c1} H_{c2}} \quad \cdots\cdots (6)$$

ここで $\hbar$ (=1.0546E-34J·s) は換算プランク定数、H_c は超伝導体の臨界磁場である。当社製造 YBCO 薄膜では $\mu_0 H_c \approx$ 1Tesla、T_c=91K であり、使用温度 T=70K においては、式 (4), (5) から、ξ =2.2 ～ 3.5nm となる。なお第二種超伝導体における H_c は下限臨界磁場 H_{c1} と上限臨界磁場 H_{c2} との相乗平均すなわち式 (6) で表される磁場換算量である。GL 理論では、(1/2) $\mu_0 H_c^2$ (T) が温度 T における常伝導と超伝導の自由エネルギーの差 (G_n-G_s) すなわち凝集エネルギーに相当するとされる。

第一種超伝導体は完全反磁性を示すが、第二種超伝導体ではある程度の磁場の侵入を許すことにより常伝導と超伝導の界面での自由エネルギーが低くなる。定性的には第一種では $\xi > \lambda_L$、第二種では $\xi < \lambda_L$ となる。第二種では半径 ξ 程度の範囲において磁場の侵入を許すことで、磁場を排除するためのエネルギーを緩和して界面は安定となる。図 1 に第二種超伝導体におけるコヒーレンス長 ξ と磁場侵入長 λ_L の関係を示す。

2.3　BCS 理論

1957 年にはシュレディンガー波動方程式を用いて超伝導電子の運動を記述する BCS 理論がバーディーン (Bardeen)、クーパー (Cooper)、シュリーファー (Schrieffer) によって提唱され、クーパー対 (Cooper Pair) と呼ばれる電子対が超伝導現象の担い手となっていることが示された。超伝導体のフェルミ準位を ε_F とし、超伝導状態にある 2 電子系全エネルギー E との差を⊿ E=E-2 ε_F とする。BCS 理論によれば、⊿ E は負となり、式 (7) のように表される [3]。

$$\Delta E = -2\eta\omega_0 \exp\left(-\frac{1}{N(0)V}\right) \quad \cdots\cdots (7)$$

$$2|\Delta E| = 3.52 k_B T_c \quad \cdots\cdots (8)$$

ここで $\hbar\omega_0$ はフォノン (正イオンで構成される格子振動) の振動エネルギー、N (0) はフェルミ面近傍の電子濃度、V は電子間の引力相互作用である。式 (7) から、クーパー電子対はフェルミエネルギー 2ε_F よりも低い基底状態に存在することを示している。図 2 (b) に模式的に示すようにフェルミ面の近傍に有限の幅の切れ目すなわちエネルギーギャップ 2 $|\Delta E|$ (これを超伝導ギャップという) ができて、その範囲に存在する電子は対を形成し、その下の ε_F-$|\Delta E|$ 付近の基底状態に落ち込んで、ボーズ凝縮を起こす。これが超伝導状態である。超伝導状態を破るためには、クーパー対あたり 2 $|\Delta E|$ のエネルギーギャップを超える必要があり、それは厳密な計算により式(8) が得られている [2]。ここでボルツマン定数 k_B=1.3807E-23J/K, T_c は超伝導体の臨界温度である。例えば $\hbar\omega_0$=0.2eV, N(0)V ≃ 0.3 程度として計算値 T_c=91K となり、高温超電導体に対応する臨界温度 T_c が得られる。T_c を上げるためには、超伝導ギャップが大きいことが必要とされる。

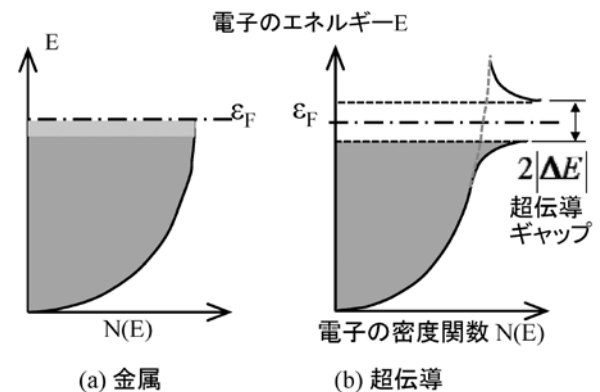



図 2　電子のエネルギー状態分布

2.4 二流体モデル理論

超伝導における電磁気的現象は超伝導電子と常伝導電子で構成される2流体モデルにより説明される。電子は絶対温度 T=0 では全て超伝導電子、臨界温度 T_c 以上では全て常伝導電子、温度範囲 $0<T<T_c$ においては超伝導電子と常伝導電子が混在しているモデルである。混在している双方の電子に対する運動方程式から次の全電流密度 J と電界 E の関係式 (9) が得られる[4]。電子運動の時間変的変動は exp (jωt) で表されるものとし、常伝導電子の格子等との衝突周波数 ν とする。ここでは超伝導フィルタに対するマイクロ波の周波数 f ($<10^{10}$Hz) を対象範囲として $\omega=2\pi f$ であり、常温では $\nu\sim10^{13}$Hz 程度である。

$$J=\varepsilon_0\left\{\frac{\omega_{pe}^2\nu}{\omega^2+\nu^2}-j\left(\frac{\omega_{ps}^2}{\omega}+\frac{\omega_{pe}^2\omega}{\omega^2+\nu^2}\right)\right\}E \quad \cdots(9)$$

$$\omega_{ps}=\left(\frac{n_s q_s^2}{m_s\varepsilon_0}\right)^{1/2} \quad \cdots\cdots(10)$$

$$\omega_{pe}=\left(\frac{n_n e^2}{m_e\varepsilon_0}\right)^{1/2} \quad \cdots\cdots(11)$$

上式において m_e, e, n_n は常伝導電子の質量、電荷、数密度である。m_s, q_s, n_s は超伝導電子の質量、電荷、数密度であり、$m_s=2m_e$, $q_s=2e$ である。また ε_0 は真空の誘電率である。

伝導電流 J と電界 E の関係は導電率 σ を用いて $J=\sigma E$ であるが、複素導電率 $\sigma=\sigma'-j\sigma''$ を定義して、式 (9) と $J=(\sigma'-j\sigma'')E$ を比較して、σ' 式 (12) および σ'' 式 (14) を導出する。以下においては、周波数範囲を $\omega\ll\nu$ とする。また超伝導領域においては $n_n\ll n_s$ であるから $\omega_{pe}\ll\omega_{ps}$ である。

$$\sigma'=\frac{\varepsilon_0\omega_{pe}^2\nu}{\omega^2+\nu^2}\cong\frac{\varepsilon_0\omega_{pe}^2}{\nu}=\frac{n_n e^2}{\nu m_e}=\frac{1}{\nu\mu_0\lambda_n^2} \quad \cdots\cdots(12)$$

$$\lambda_n^2=\frac{m_e}{\mu_0 n_n e^2} \quad \cdots\cdots(13)$$

$$\sigma''=\varepsilon_0\left(\frac{\omega_{ps}^2}{\omega}+\frac{\omega_{pe}^2\omega}{\omega^2+\nu^2}\right)\cong\varepsilon_0\frac{\omega_{ps}^2}{\omega}=\frac{n_s q_s^2}{\omega m_s}=\frac{1}{\omega\mu_0\lambda_s^2} \quad (14)$$

$$\lambda_s^2=\frac{m_s}{\mu_0 n_s q_s^2} \quad \cdots\cdots(15)$$

マイクロ波が導体表面に垂直 (z 方向) に入射するときの電界 E は、マイクロ波理論によれば、その伝搬定数 $\gamma=\alpha+j\beta$ として、$E=E_1\exp(j\omega t-\gamma z)$ と表すことができる。E_1 は振幅、α は減衰定数、β は位相定数である。また伝搬定数は導体の導電率 σ_n、誘電率 ε、透磁率 μ_0 とするとき、式 (16) で表される。ここで一般に導体においては $\sigma_n\gg\omega\varepsilon$ である。マイクロ波が導体中を伝搬するとき $\exp(-\alpha z)$ で減衰するので、その振幅が exp (-1) となる深さを"表皮の深さ" δ と名付けて式 (17) で定義される[5]。例えば、銅 σ_n=5.8E+7S/m に対して周波数 1GHz では、δ =2.1μm であり、周波数 10GHz では、δ=661nm となる。

$$\gamma=\alpha+j\beta=\sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_n+j\omega\varepsilon)}\cong\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_n} \quad (16)$$

$$\delta=\frac{1}{\alpha}=\sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma_n}} \quad \cdots\cdots(17)$$

一方、超伝導薄膜基板に対する伝搬定数 $\gamma'=\alpha'+j\beta'$ も同様に式 (16) で表されるが、導電率は複素導電率 $\sigma=\sigma'-j\sigma''$ であり、式 (12) ～ (15) を以って計算される。式 (16) において σ_n を $\sigma'-j\sigma''$ に置き換えて、伝搬定数 $\gamma'=\alpha'+j\beta'$ は式 (18) ～ (20) のように導出できる。下式においては、$\sigma'\ll\sigma''$ すなわち $\omega n_n\ll\nu n_s$ が十分に満足される条件としている。

$$\gamma'=\alpha'+j\beta'=\sqrt{j\omega\mu_0(\sigma'-j\sigma'')}\cong\sqrt{\omega\mu_0\sigma''}\left(1+j\frac{\sigma'}{2\sigma''}\right)=\frac{1}{\lambda_s}\left\{1+j\frac{\omega}{2\nu}\left(\frac{\lambda_s}{\lambda_n}\right)^2\right\}\cong\frac{1}{\lambda_s} \quad (18)$$

$$\alpha'=\sqrt{\omega\mu_0\sigma''}=\sqrt{\omega\mu_0\frac{1}{\omega\mu_0\lambda_s^2}}=\frac{1}{\lambda_s} \quad \cdots\cdots(19)$$

$$\beta'=\frac{\sigma'}{2\sigma''}\sqrt{\omega\mu_0\sigma''}=\frac{1}{2}\frac{\omega\mu_0\lambda_s^2}{\nu\mu_0\lambda_n^2}\frac{1}{\lambda_s}=\frac{\omega}{2\nu}\left(\frac{\lambda_s}{\lambda_n}\right)^2\frac{1}{\lambda_s} \quad \cdots(20)$$

式 (19) から、超伝導薄膜基板における表皮の深さ δ' は式 (21) となる。ここで λ_s は式 (15) から、式 (22) であり、これは絶対温度 T ($0<T<T_c$) におけるロンドンの磁場侵入長 λ_L に等しい。

$$\delta'=\frac{1}{\alpha'}=\frac{1}{\sqrt{\omega\mu_0\sigma''}}=\lambda_s \quad \cdots\cdots(21)$$

$$\lambda_s=\sqrt{\frac{m_s}{\mu_0 n_s q_s^2}}=\lambda_L \quad \cdots\cdots(22)$$

大変興味深いが、常伝導に対する表皮の深さ δ は上記のように周波数 ω に依存するが、超伝導薄膜に対する δ' は λ_L に等しくなり、周波数に依存しない (但し $\omega n_n\ll\nu n_s$ であること)。2.1 項において示したが、当社製造 YBCO 薄膜では温度 T=70K においては、$\delta'=\lambda_L$= 66 ～ 104nm である。それに対して上記のように δ =661nm (周波数 10GHz) であるから、δ'= (0.1 ～ 0.16) δ である。このことはマイクロ波が導体表面を伝搬するときに、超伝導薄膜の膜厚は通常導体 (銅など) の膜厚に比べて十分に薄くできることを意味する。これは超伝導薄膜製造における大きなメリットである。それ故当社製造 YBCO 薄膜の必要膜厚は δ' の (3 ～ 5) 倍とし、製品の標準膜厚 t=300nm としている。

2.5　表面抵抗とＱ値

マイクロ波は導体中において“表皮の深さ”程度の領域を伝搬する。その電界 E_t と磁界 H_t は導体表面接線方向において互いに直交し、振幅は複素量で表される。その比を表面インピーダンス Z_s として定義し、常伝導体に対して式 (23) で与えられる。その実部の式 (24) が常伝導の表面抵抗 R_{sn} である。ここで導体の導電率 σ_n、誘電率 ε であり一般的に $\sigma_n \gg \omega\varepsilon$ である。

$$Z_s = \frac{E_t}{H_t} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma_n + j\omega\varepsilon}} \cong \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma_n}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma_n}}(1+j) \quad (23)$$

$$R_{sn} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma_n}} \quad \cdots\cdots (24)$$

一方、超伝導体に対する表面インピーダンス Z_{ss} は、上式の σ_n を 2 流体モデルから求めた複素導電率 $\sigma = \sigma' - j\sigma''$ に置き換えて、式 (23) に式 (12), (14) を代入して得られる。ここで $\sigma' \ll \sigma''$ すなわち $\omega n_n \ll \nu n_s$ が十分に満足される条件としている。

$$Z_{ss} = R_{ss} + jX_{ss} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma' - j\sigma''}} \cong \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\sigma''}}\left(\frac{\sigma'}{2\sigma''} + j\right) \quad (25)$$

$$X_{ss} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\sigma''}} = \sqrt{\omega\mu_0 \cdot \omega\mu_0\lambda_s^2} = \omega\mu_0\lambda_s \quad \cdots\cdots (26)$$

$$R_{ss} = \omega\mu_0\lambda_s \cdot \frac{n_n e^2}{\nu m_e} \cdot \frac{\omega\mu_0\lambda_s^2}{2} = \frac{\omega^2\mu_0^2\lambda_s^3 n_n e^2}{2\nu m_e} \quad (27)$$

$$\frac{n_n}{n_s} = \left(\frac{T}{T_c}\right)^4 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4\right]^{-1} \quad \cdots\cdots (28)$$

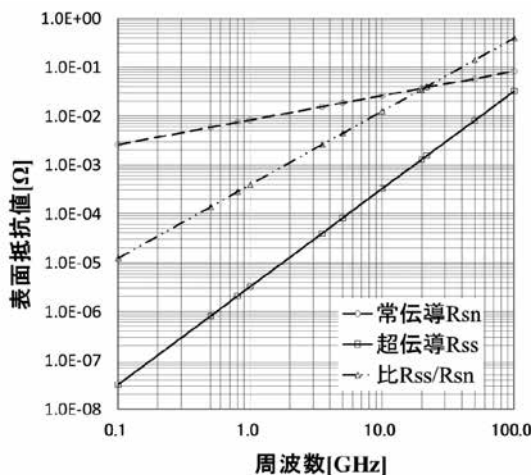



図 3 表面抵抗の周波数特性

式 (26) の X_{ss} が超伝導体に対する表面リアクタンスであり、kinetic inductance と言われ、超伝導電子の運動エネルギーに基づくインダクタンスである。式 (25) の実部 R_{ss} が超伝導体に対する表面抵抗である。式 (27) から R_{ss} は ω^2 すなわち周波数の 2 乗に比例し、磁場侵入長 λ_s の 3 乗に比例する量である。式 (28) は温度 T における常伝導と超伝導の電子密度の関係を表し、二流体モデル理論から導かれる。

当社 YBCO 薄膜に対応する温度 T=70K、磁場侵入長 λ_s=104nm、常伝導電子の衝突周波数 ν=3.2E+11Hz をパラメータとして、周波数 0.1 ～ 100GHz に対する常伝導と超伝導のそれぞれの表面抵抗 R_{sn} と R_{ss} およびその比 R_{ss}/R_{sn} の計算結果を図 3 のグラフに表す。R_{sn} の計算には銅導電率 σ_n=5.8E+7S/m を用いた。（上記のパラメータにおいて周波数 21.8GHz に対する計算値 R_{ss}=1.54mΩとなり、測定値 1.55mΩにほぼ等しい。）モバイル通信周波数帯：0.8 ～ 3.5GHz において、R_{ss}/R_{sn} ≒ 1/3500 ～ 1/400 程度である。マイクロ波回路における損失は表面抵抗に比例する。従って常伝導に比べて超伝導フィルタにおける回路損失（これを“挿入損失”という）は極めて低い値となる。

Q 値（Quality Factor）に関して、一般に回路系に蓄積されるエネルギー U、回路内で消費される電力 P とすれば、Q= ωU/P として定義される。フィルタ基板回路における P として薄膜導体だけでの損失を考える。（実際には基板の誘電体損失や接続損失があるが、簡略して考える。）このとき P は超伝導と常伝導いずれのフィルタ基板回路においても R_s に比例する。一方 U はフィルタ基板の誘電率 ε と回路パターンでほぼ決定されるので、常伝導と超伝導フィルタ回路とでほぼ等しい。従って超伝導と常伝導の Q 値をそれぞれ Q_s と Q_n として、次のように概算できる。

$$Q_s/Q_n \cong P_n/P_s = R_{sn}/R_{ss} \fallingdotseq 3500 \sim 400$$

（@周波数帯：0.8 ～ 3.5GHz）

常伝導回路においては通常 Q_n ≒ 300 ～ 500 程度であるから、超伝導に対する Q_s は最小でも 120000 程度（@周波数 3.5GHz）になる。これは一般回路系において非常に高い Q 値である。

Q 値が高い回路はその共振周波数において急峻な共振特性を示し、周波数選択性が高い。Q が高い共振回路をカスケードに多段結合することにより、通過帯域エッジにおいて“急峻な遮断エッジ”が得られ、通過帯域外において“大きな帯域外減衰”が得られる。（図 9，図 10 参照）超伝導薄膜回路は上述のように、表面抵抗が極めて低く、非常に高い Q 値を有するから、これを用いて“低い挿入損失”“急峻な遮断エッジ”“大きな帯域外減衰”を実現する最適なバンドパス・フィルタを形成できる。

3. 超伝導 YBCO 薄膜の製造と特性

3.1 超伝導 YBCO 薄膜の製造

超伝導薄膜製造方法の一つとして、塗布熱分解法（Metal Organic Decomposition 以下 MOD 法）がある。MOD 法とは、超伝導体を構成する金属元素を含む有機化合物溶液を基板に塗布して熱分解させ、さらに高温で雰囲気制御しながら熱処理を行うことにより超伝導薄膜を作製する方法である。我々は MOD 法における金属有機化合物の熱分解過程の一部をレーザによる光分解で置き換えることにより、超伝導特性の向上、高速成膜（熱処理時間の大幅な短縮）を可能にした JSW 独自開発の塗布熱分解法（Excimer Laser Assisted MOD 以下 ELAMOD 法）を用いて超伝導薄膜を成膜している。

ELAMOD 法による YBCO（$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$：$0 < \delta \leqq 0.2$）の製造プロセスは、原料溶液を合成し、基板に 1 回塗布し、乾燥後にレーザ照射を行った後、焼成を行うといった単純な製造方法である。図 4 にそのプロセスを示す。

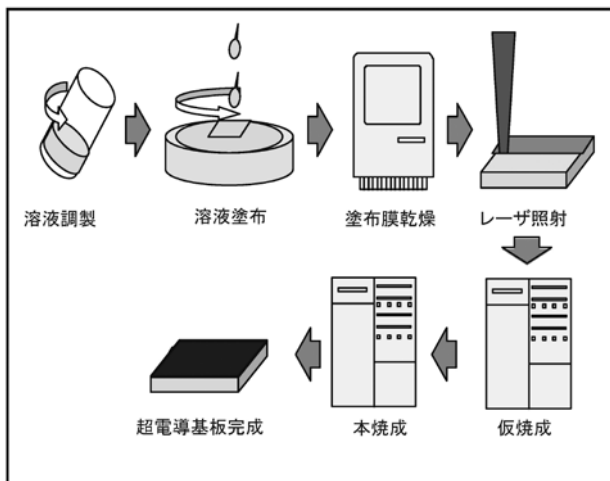



図 4　ELAMOD 法による YBCO 膜製造方法

3.2 超伝導 YBCO 薄膜の特性

超伝導薄膜の開発当初は臨界電流密度 Jc に着目して開発を進めてきた。しかし、フィルタに加工した後にマイクロ波フィルタ特性を決定付ける電気的物性値は表面抵抗 Rs である。2.5 項で述べたように Rs が低い程 Q 値は高く、周波数選択性の高い優れたバンドパス・フィルタを形成できる。この Rs と Jc の関係に着目し、両者の相関について検証実験を行った。

【実験方法】

当社 ELAMOD 製造法により膜厚 300nm の YBCO 薄膜基板を 6 枚作成し、臨界電流密度 Jc を液体窒素中（77K）で測定した。また表面抵抗はマイクロ波空洞共振法により周波数 21.8GHz において測定した。

【表面抵抗と臨界電流密度の相関】

温度 10K, 70K, 77K に対して表面抵抗 Rs を測定し、77K に対して臨界電流密度 Jc を測定した。その測定結果を図 5 に示す。いずれの温度においても Jc が 1.1 ～ 2.0MA/cm^2 において Rs は次第に低下する傾向を有している。Jc が 1.1MA/cm^2 以下においては Rs が急激に増加する傾向がみられる。

超伝導薄膜の表面抵抗 Rs は 2.5 項で説明したように周波数の 2 乗に比例する。基準周波数 f_0（21.8GHz）における表面抵抗を Rs_0 とすれば、Rs は式（29）で与えられる。マイクロ波フィルタについてはモバイル通信周波数帯 0.8 ～ 3.5GHz に対して Rs を評価すればよい。

$$R_s = R_{so}\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \quad \cdots\cdots(29)$$

図 5 において温度 70K，Jc ～ 1.1MA/cm^2 においては表面抵抗 Rs_0 は 2mΩ程である。これに対して式（29）から Rs=0.05mΩ（@周波数：3.5GHz）となる。一方、銅の表面抵抗は 15mΩ程度（@周波数：3.5GHz）であり、超伝導薄膜の Rs は銅よりも 2 桁以上小さい。この値はフィルタに要求される表面抵抗値を十分満足している。すなわち温度 70K 以下で臨界電流密度が 1.1MA/cm^2 以上であれば、フィルタに適用可能な YBCO 膜であると判断される。また、臨界電流密度 Jc と表面抵抗 Rs の相関が明らかになったため、測定された臨界電流密度から表面抵抗を予測する事が可能となった。

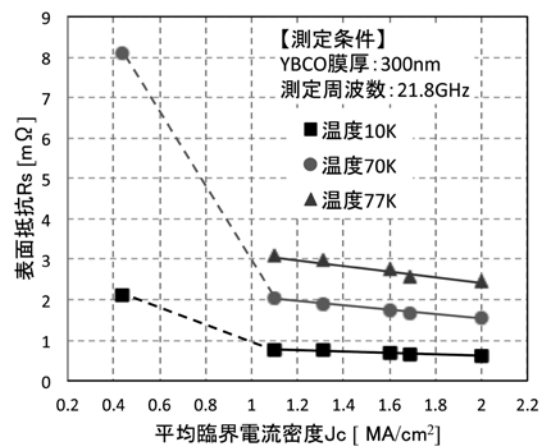



図 5　臨界電流密度と表面抵抗の相関

4. 超伝導フィルタの製造と特性

4.1 フィルタ加工方法

YBCO 薄膜の加工には、半導体製造に用いられている手法が適応できる。基本プロセスは、フォトリソ加工とエッチング加工となる。図 6 に基づいて説明すると、

サファイア基板上に成膜されたYBCO 薄膜上にスパッタ法を用い、Au 薄膜を形成する。Au 薄膜を形成する理由はYBCO 薄膜自身、水分等に弱いためその保護と、入出力端子の接続を容易にするために行われる。その後、ポジ型フォトレジストを所望の膜厚にスピンコートし、レジスト層を形成する。プリベーク後、製作フィルタのパターンマスクを用いて紫外線露光を行い、現像・リンス・乾燥を行い、レジストパターンを形成する。次にエッチング耐性を向上させるためにポストベークを施す。その後、ドライエッチング加工を行う。ドライエッチングの注意点は、基板温度を上昇させないことと、イオンダメージを抑えることである。

こうして得られたパターン面基板に、YBCO 基板を貼り合わせる事で両面超伝導フィルタを完成させている。

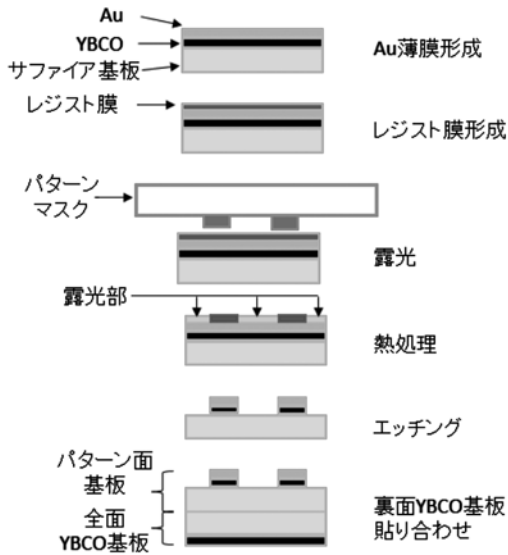



図 6　フィルタ加工工程

4.2　超伝導フィルタの特性

超伝導薄膜基板（Jc 値 2MA/cm^2、表面抵抗 Rs:1.55mΩ @70K,21.8GHz）を用いて、モバイル通信基地局への適用を目指したデュアルバンド・フィルタ（2 つの周波数通過帯域を有するフィルタ）を試作・評価した。以下にその結果を述べる。

4.2.1　超伝導薄膜を用いたデュアルバンドフィルタの原理

超伝導フィルタは、超伝導薄膜の表面抵抗が極めて小さいことを利用し、フィルタパターンは周波数通過帯域に対応する共振器を組み合わせることで設計される。2.5 項で説明したように共振器の Q 値（＝蓄積エネルギー / 回路損失）に関して、超伝導薄膜の場合は少なくとも 100,000 以上であり、常伝導薄膜に比較して 2 ～ 3 桁以上高い。従って周波数選択性が急峻でかつ挿入損失が少ないフィルタが実現できる。

デュアルバンドフィルタの原理は、一つの共振器に二つの共振モードを存在させることである。図 7 に示すように一つの共振器はヘアピンとスタブのパターンを組み合わせて構成される。この構成に対してフィルタ共振周波数に対する波長をλとして、ヘアピンとスタブを直列とするλ/4 の共振（偶モード）とヘアピンのみのλ/2 の共振（奇モード）が存在する。二つの共振モードはある程度任意に共振周波数を設計できるので、2 つの周波数通過帯域を有するデュアルバンドフィルタの設計が可能となる。急峻なフィルタ特性を達成するためにはその共振器数を増やすこと（共振器の多段化）で達成できる。

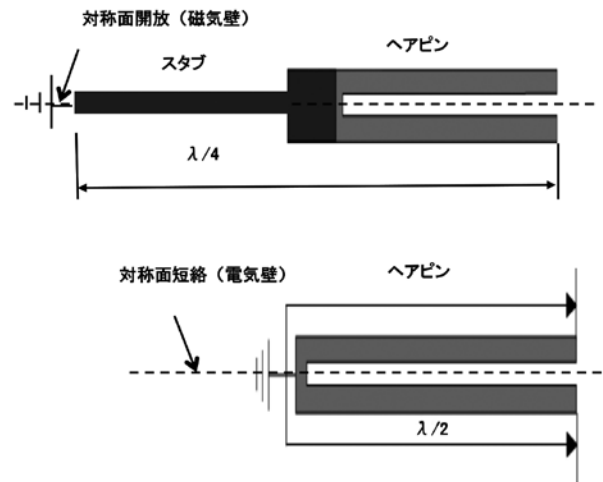



図 7　デュアルバンドフィルタ原理

4.2.2　4 段デュアルバンドフィルタの特性評価

上記原理に基づいて 4 つの共振器パターンをカスケード接続した 4 段デュアルバンドフィルタを設計・試作した。電波伝搬特性が移動体通信に適していると言われるプレミアムバンド 800MHz 帯および 2GHz 帯を二つの通過帯域バンドとして選定した。図 8 に 4 段デュアルバンドフィルタ実装写真と図 9 に測定結果とシミュレーションの比較を示す。挿入損失は 800MHz 帯では約 0.5dB、2.0GHz 帯では約 0.2dB であった。図 9 より、帯域内通過および遮断エッジ特性、帯域外減衰特性において測定結果はシミュレーションとほぼ一致しており、優れたフィルタ特性を示していることが分かる。

また、超伝導フィルタとの性能比較として、常伝導フィルタの評価例を挙げると、共振器 6 段のデュアルバンド・フィルタ（900MHz、2.4GHz）において、挿入損失は 900MHz 帯では約 2.5dB、2.4GHz 帯では約 2.8dB との報告例がある [6]。両者の挿入損失 [dB] を電力損失 [%] に換算して比較すると、超伝導フィルタでは 800MHz 帯で 11% 程度に対して常伝導フィルタは 900MHz 帯で 44% と超伝導フィルタの方が電力損失が約 1/4 と非常に優位なことが分かる。また常伝導に比べて超伝導フィルタはより急峻な遮断エッジ、大きな帯域外減衰が得られている。

図 8　4 段デュアルバンドフィルタ写真

図 9　4 段デュアルバンドフィルタ特性

4.2.3　6 段デュアルバンドフィルタの特性評価

モバイル通信 4G 世代にリリースされる周波数バンド 3.5GHz を含む 6 段デュアルバンドフィルタ（中心周波数 2.2GHz,3.5GHz）を試作した。図 10 に測定結果とシミュレーションの比較を示す。挿入損失は 2.2GHz 帯では約 0.3dB、3.5GHz 帯では約 0.6dB であった。帯域内通過および遮断エッジ特性、帯域外減衰特性どちらにおいても測定結果は、シミュレーションとほぼ一致しており、優れたフィルタ特性を示していることが分かる。

また、常伝導フィルタの例として共振器 6 段のデュアルバンド・フィルタ（中心周波数 2.4GHz,3.5GHz）において、挿入損失は 2.4GHz 帯では約 2.8dB、3.5GHz 帯では約 4.5dB との報告例がある[7]。電力損失 [%] で比較すると、超伝導フィルタでは 3.5GHz 帯で 13% に対して常伝導フィルタは 3.5GHz 帯で 65% と超伝導フィルタの方が電力損失が約 1/5 と非常に優位なことが分かる。

図 10　6 段デュアルバンドフィルタ特性

5.　超伝導フィルタシステムの概要

超伝導フィルタと LNA（信号増幅用のローノイズアンプ）を真空デュア内に実装し、冷凍機と真空排気管等を一つのユニットとして組み込んだ図 11 に示す超伝導フィルタシステムを開発した。これはモバイル通信基地局のフロントエンドへの適用を目指したものである。ユニットの大きさは、360 × 210 × 380mm と非常にコンパクトである。図 12 にシステム・ブロック図を示す。

このシステムを用いて、4.2.3 項に記載した 6 段デュアルバンド受信フィルタとローノイズアンプ（ゲイン 10dB 仕様）を組み合わせた時のフィルタ特性を図 13 に示す。利得が 10dB となり、仕様を満たす結果が得られた。また、帯域外における信号減衰量は -60dB と良好な遮断特性が得られた。

図 11　超伝導フィルタシステム実装写真

図 12　超伝導フィルタシステム・ブロック図

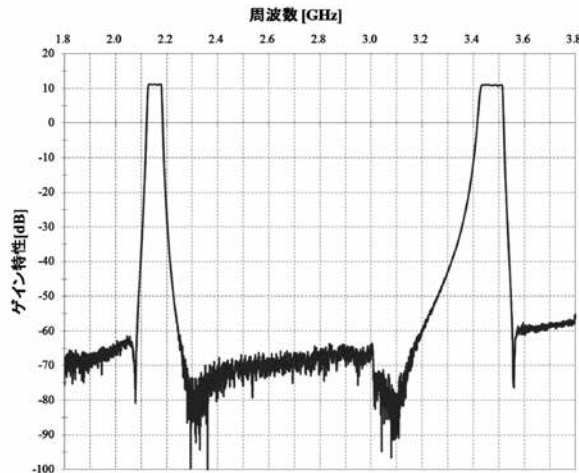



図 13　超伝導フィルタ＋ LNA でのフィルタ特性

6.　まとめ

当社超伝導 YBCO 薄膜を用いた超伝導フィルタの開発において次の成果が得られた。

(1)　当社 YBCO 薄膜に関して超伝導理論を適用解析して磁場侵入長は 66 ～ 104nm であり、従ってマイクロ波フィルタ用として当社標準膜厚を 300nm とする妥当性が検証された。また、臨界磁場、臨界温度に関しても第二種高温超伝導体としての適正な仕様値が確認された。

(2)　二流体モデルから導出される表面抵抗の解析値と当社 YBCO 薄膜の実測値はほぼ一致し、そこから超伝導薄膜の Q 値が 100,000 以上の非常に高い値を示すことを検証した。すなわち、超伝導薄膜を用いて"低い挿入損失""急峻な遮断エッジ""大きな帯域外減衰"を実現する超伝導フィルタを形成できることが示された。

(3)　Jc 値 $2MA/cm^2$、表面抵抗 Rs:1.55mΩ(@70K,21.8GHz) の YBCO 基板を用いて超伝導デュアルバンドフィルタを試作し特性評価を行った。4 段デュアルバンド・フィルタ（中心周波数 800MHz、2GHz）ならびに 6 段デュアルバンド・フィルタ（中心周波数 2.2GHz、3.5GHz）に対して、帯域内通過特性、帯域外遮断特性いずれも測定結果とシミュレーションはほぼ一致しており、優れた超伝導フィルタ特性を示していることが分かった。この超伝導フィルタは移動体通信や気象、衛星等の多様な通信分野への応用が考えられる。

7.　謝　　辞

本開発を進めるにあたり、超伝導薄膜に関する有益なご助言と表面抵抗測定では山形大学の大嶋重利元教授、フィルタ設計・評価では山梨大学の鬭谷尚人助教、フォトリソ及びデバイス加工では神奈川県産業技術センターの安井学主任研究員の各位に多大なる御協力を頂きました。皆様に感謝申し上げます。

参　考　文　献

1) 日本製鋼所."ELAMOD 法を適用した超電導薄膜の特性". 日本製鋼所技報第 62 号 (2011).

2) 家泰弘."超電導". 朝倉書店. ISBN 978-4-254-13725 C3342

3) 村上雅人."高温超電導の材料科学". 内田老鶴圃. ISBN 978-4-7536-5610 C3042

4) 大沼俊朗."超電導電磁気学". コロナ社. ISBN 4-339-00635-1

5) JIA-SHEN G.HONG, M.LANCASTER, "Microstrip Filters for RF/Microwave Applications" ISBN: 0471221619,9780471221616

6) W.S.Chang et al, "Analytical Design of Microstrip Short-Circuit Terminated Stepped-Impedance Resonator Dual-Band Filters", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol.59, No.7, 2011, pp.1730-1739.

7) Chen, F.-C. et al, "Novel Multistub Loaded Resonator and Its Application to High-Order Dual-Band Filters", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol.58, 2010, pp.1551-1556.

異方向回転二軸混練押出機“CIMシリーズ”高能力化技術の開発

Technology Development to Increase the Throughput of Counter Rotating Twin-screw Extruderkakko ‘CIM Series’

石川　誠
Makoto Ishikawa

高本　直樹
Naoki Takamoto

高本　誠二
Seiji Takamoto

山澤　隆行
Takayuki Yamazawa

牛尾　剛
Takeshi Ushio

柿崎　淳
Jun Kakizaki

要　　旨

近年のシェールガス生産の本格化に伴う原油価格の下落により、汎用ポリオレフィン製品の市場における各石油化学メーカは、製品の競争力を高める為に、品質の向上と製造コストの削減を目的に、大処理量化、高付加価値化のニーズを高めてきている。そのような情勢の中、年々拡大する市場に逸早く製品を供給し市場シェアを維持拡大するため、安価な原材料を容易に調達できる地域や、樹脂製品の需要の大きな地域に、新規大型プラントの建設が計画されている。プラントの生産能力は、年々増大の一途を辿り、生産に関わる装置は高能力化対応を求められている。

当社はポリオレフィンの造粒機として最適化されたCIM（Continuous Intensive Mixer）シリーズを1960年代後半に上市して以来、市場要求を満たす為に技術開発を継続し、その技術を市場に提案すると共にCIMに採用してきた。本報ではCIMの開発の歴史、大型化および高能力化技術について紹介する。

―― Synopsis ――

In the market of polyolefin, due to the recent trend of decline in oil prices after the fully in progress of shale gas production, there is a demand to increase plant capacity and to produce high value added polymer in order to increase their competitiveness. Many polyolefin manufacturers build new massive scale plants in the areas where inexpensive raw material is available. There is close and/or easily access to a big market demand in order to supply their products on demand and increase their market share. The plant capacity has grown year after year, therefore extruder has been expected to have a commensurate capacity with big plant.

Since CIM (Continuous Intensive Mixer) series launched in 1960's, we've been developed the innovative technologies for CIM and offering them to the market for responding to the latest market demands. This report describes the history and performance improvement of CIM which has responded to the market demand.

1. 緒　　言

ポリエチレンを含むエチレン系誘導品の需要推移は、2018年まで増加する見通しであり、この増加する需要に応えるため、ポリエチレンの生産能力は2018年まで年平均4.2%で増加すると予想されている。生産地域で分けると、アジア、北中南米、中東において、年3-4%の生産能力の増加が予想され、特に中国、インドは高い増加が見込まれる[1]。近年のシェールガス生産の本格化に伴う原油価格の下落により、汎用ポリオレフィン製品の市場における各石

広島製作所　樹脂製造機械部
Plastic Machinery Dept., Hiroshima Plant

油化学メーカは製品の競争力を高める必要を迫られた。そのため、製造コストの削減を目的にした大処理量化と、製品の機能性を高める高付加価値化へのニーズが一層高まった。そのような情勢の中、年々拡大する市場に逸早く製品を供給し市場シェアを維持拡大するため、原材料が安く調達できる地域や需要の大きな地域に、新規プラントとして、1 系列当りの処理量が 100Ton/h となる大型プラントも計画されている。

当社は、ポリオレフィンの造粒機として最適化された CIM シリーズを、1960 年代後半に上市して以来、市場要求を満たす為に技術開発を継続し、その技術を採用した CIM を市場に提案してきた。本報では、CIM の開発の歴史と大型化および高能力化技術について紹介する。

2. CIM の歴史

1960 年代初頭、日本国内で樹脂製品の需要が高まると同時に、国内石油化学メーカは海外から樹脂のプロセスライセンスを導入し、本格的にポリオレフィンの生産を開始した。当時のポリオレフィン用造粒機は単軸押出機が主流であり、時間当たり 1 系列の処理量は、最大 4Ton/h 程度であった[(2)]（図 1）。日本の高度経済成長期に入ると樹脂製品の需要が拡大し、1970 年代終わりには処理量が 10Ton/h 以上へ跳ね上がった。当社は急速に増加するプラント生産量に応えるため、二軸スクリュ押出機を開発し、第 1 世代の CIM（Continuous Intensive Mixer）を上市した[(2)]（図 2）。この CIM は、当時主流の単軸押出機に代わり、その後のポリオレフィン業界の発展に大きく貢献した。

第 1 世代の CIM は、異方向回転非噛合い型二軸スクリュを搭載した二軸混練押出機と高い昇圧能力を持つ単軸押出機を連続的に接続したタンデムスタイルを採用した。二軸スクリュ化された二軸混練押出機は、機内の空間容積の拡大による輸送能力の増加と回転するスクリュのフライトとバレル内面の隙間での効果的なせん断作用により、単軸押出機と比較して多量の樹脂を可塑化混練することが可能となった。また、この二軸混練押出機は、スクリュ両端をベアリングでサポートする特徴的な構造を有し、高速回転を達成した。

第 1 世代 CIM は、国内外から多くの需要があり、約 150 台が製造・納入された。当時の CIM の最大処理量は約 20Ton/h であった。

1990 年代に入ると、プラント生産量の更なる増加要求に伴い押出機サイズも大型化し、第 1 世代の CIM は広い設置スペースが必要であったことから省スペース化への要望が高まった。そこで、昇圧装置として採用していた単軸押出機に代わり、さらに昇圧効率に優れた自社製ギアポンプを二軸混練押出機に直結した省スペース型の第 2 世代の CIM を上市した。現在は、第 2 世代から二軸混練押出機に標準装備されている混練調整機構を改良した第 3 世代の CIM（図 3）が上市され、これまでに第 2 世代と合わせて 50 台以上が製造・納入されている。また、市場要求として計画されている処理量である、100Ton/h に対応できる大型機の基本設計は完了している。

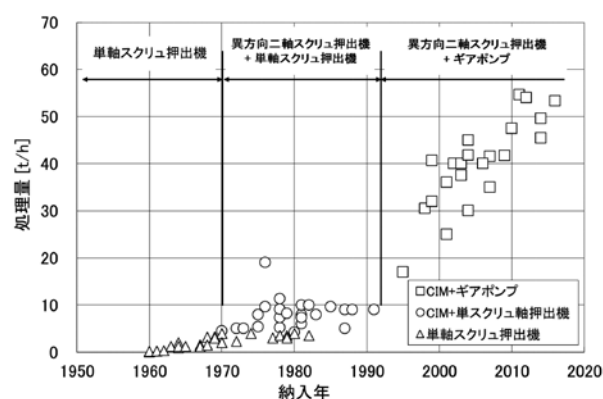



図 1　造粒機時間当たり 1 系列の処理量の遷移

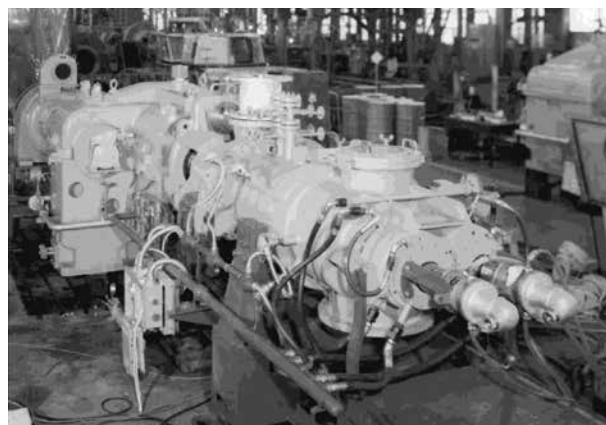



図 2　第 1 世代 CIM の二軸混練押出機

図 3
第 3 世代 CIM の構成

3. CIM の特徴

3.1 基本構成

CIM の基本構成は、二軸混練押出機、ギアポンプ、スクリーンチェンジャー、水中カッティング装置（以下、UWC）で構成され、二軸混練押出機は、モータ、減速機、ホッパー、スクリュが内蔵されたシリンダで構成されている（図 4）。

原料は粉状または粒状の樹脂パウダであり、二軸混練押出機のフィードホッパーへロータリーフィーダ等で定量供給される。供給された樹脂は、内蔵されているスクリュで搬送され、スクリュに組み込まれた可塑化混練スクリュのフライトチップで大きなせん断応力を受けることにより発熱し溶融する。溶融した樹脂は、スクリュによってギアポンプへ搬送される。ギアポンプは、溶融樹脂をスクリーンチェンジャーおよびダイプレートを通過させ UWC の水室中に排出させるための昇圧装置である。スクリーンチェンジャーは溶融した樹脂中の異物の濾過装置である。直径数 mm のノズルを多数有したダイプレートを通過し、紐状に形成された溶融樹脂は UWC の水室中に排出され、ダイプレートに接して配置されたカッティング装置によって水中で粒状のペレットに切断される。造粒されたペレットは水と共に冷却されながら脱水機へ移送され、水と分離された後、振動選別機などで規定の大きさに選り分けられて製品となる。

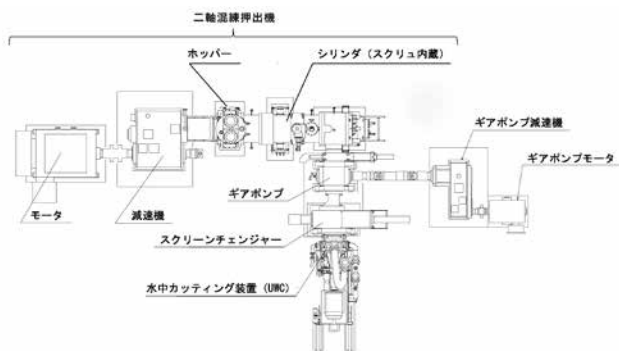



図 4　CIM の配置図

3.2 可塑化混練スクリュ

二軸混練押出機のスクリュは、重合プロセス毎にライセンサよりラボテスト等を通じて認証を受けた形状が採用される。スクリュ形状は、混練スクリュであるロータが組み込まれた混練部を１箇所に配置した１段混練タイプと、２箇所に配置した二段混練タイプに大別される（図 5）[2]。前者は、分子量分布が単峰性の Mono-modal の様に、比較的少ないエネルギーで均一な混練が可能なポリエチレンに使用され、後者は分子量分布が双峰性の Bi-modal など高分子量成分を均一に分散させるために混練エネルギーをより多く付与させる必要のあるポリエチレンに使用される。

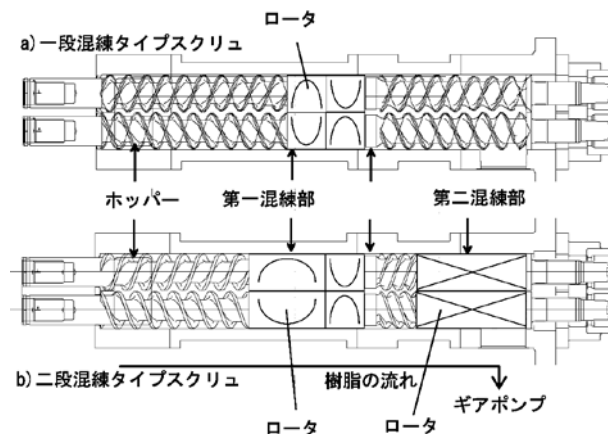



図 5　典型的な二軸混練押出機のスクリュ形状

3.3 混練調整機構

二軸混練押出機は、様々な特性を有したポリオレフィンを均一に可塑化混練するために、生産される樹脂の特性に応じて与える混練エネルギーを調整する必要がある。混練エネルギーの調整には、標準装備された混練調整機構を使用し、シリンダ内の流路容積を変化させたり、二軸混練押出機の排出圧（ギアポンプ吸入圧）を変化させたりすることで、スクリュの樹脂充満状態を制御し、滞留時間を変化させることにより、樹脂に与える混練エネルギーを調整することが可能である。

現在 CIM の混練調整機構には、ロータリースロットバー（以下、RSB）を標準採用している（図 6）[5]。RSB は、二軸混練押出機のスクリュに対し、直角方向に上下二本のスロットバーが挿入されている構造で、上下のスロットバーを回転させることによって樹脂の流路形状を変化させ、樹脂が混練部スクリュに充満する状態を変化させる機能を有している。また、スロットバーは円柱形状で、摺動面が小さく系外から混入する可能性のある酸素等のガスに対するシール性が高い構造である。

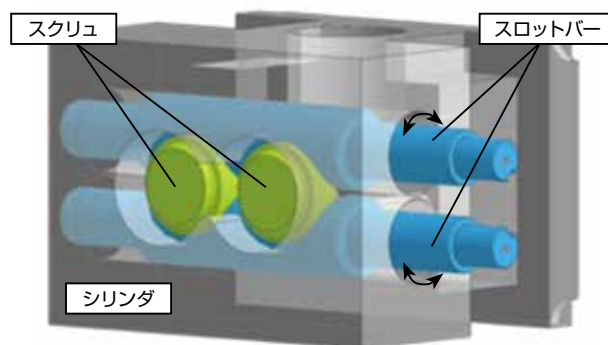



図 6　ロータリースロットバー（RSB：Rotary Slot Bar）の構造

4. 高能力化技術

生産能力の増加という市場の要求に対して、二軸混練押出機を大型化することにより対応する一方、二軸混練押出機のパウダ輸送効率と可塑化混練効率を高める高能力化技術の開発も行ってきた。以下に、これらの高能力化技術について紹介する。

4.1 特殊フィードシリンダによるフィード能力の向上

二軸混練押出機に供給される原料は、主に小粒径のパウダ状であり、この様な原料のフィード能力は、式 (1) で表され、スクリュの搬送能力と原料の嵩密度に依存する。

$$Q \propto VN\rho \ \ [\mathrm{kg/min}] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

ここで、

$$Q: 処理量 \ [\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{min}}]$$

$$V: スクリュの容積 \ [\mathrm{m}^3]$$

$$N: スクリュ回転速度 \ [\mathrm{rpm}]$$

$$\rho: 原料の嵩密度 \ [\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}]$$

二軸混練押出機のホッパーに供給された原料は、フィードスクリュによって可塑化混練部に搬送され、圧縮・溶融する際に元々原料に含まれている窒素等のガスが分離する。可塑化混練部では樹脂が充満し、かつ高い圧力が発生するため、大部分のガスは上流のホッパーへと逆流する。ホッパーに供給された原料は逆流したガスと衝突するためさらに嵩密度が小さくなり、スクリュの原料搬送機能を阻害しフィード能力を低下させる。そのため、フィード能力の向上には、逆流するガスを効果的に除去し、スクリュの搬送効率を高める必要がある。

そこで、発生したガスを分離し、通過させる流路をシリンダ内面の上部に形成した特殊フィードシリンダを開発した (図 7)[(3)]。この特殊シリンダは、ホッパーと可塑化混練部の間に適用する。パウダ平均粒径 = 890μm の HDPE を用い、CIM90 にて、スクリュ回転速度 = 280rpm、RSB 開度 = 30 度の条件で特殊フィードシリンダ有無の性能比較実験を実施したところ、特殊シリンダを用いるとフィード限界処理量は、標準シリンダに比べ 22% 増加した (図 8)。

さらに、原料に含まれるガスを積極的に分離し系外に排出する脱ガスシリンダ (De-gassing Cylinder 以下、DGC) を開発した[(4)]。DGC (図 9) は内蔵されたスクリーン下部に、原料パウダを捕捉してフィルタを形成させ、大気圧あるいは負圧雰囲気でガスのみを分離し系外に排出することで、原料パウダの搬送効率を高めるシリンダである。CIM90 を用いた大気圧条件でのテストでは、標準シリンダに比べフィード限界処理量は 30% 増加した。更に負圧条件下では標準シリンダよりフィード限界処理量が 80% 増加した (図 10)。

図 7 特殊フィードシリンダ (CIM90)

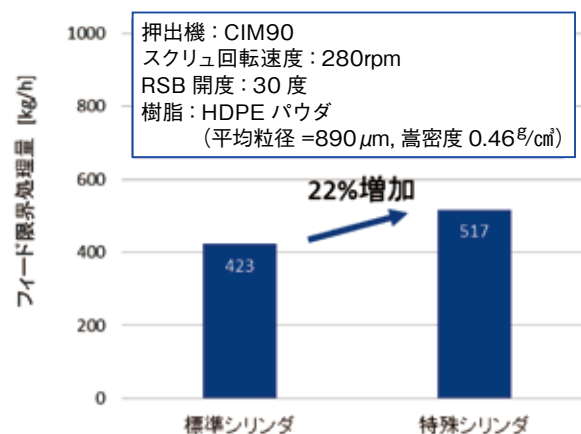



図 8 特殊シリンダと標準シリンダのフィード限界処理量の比較

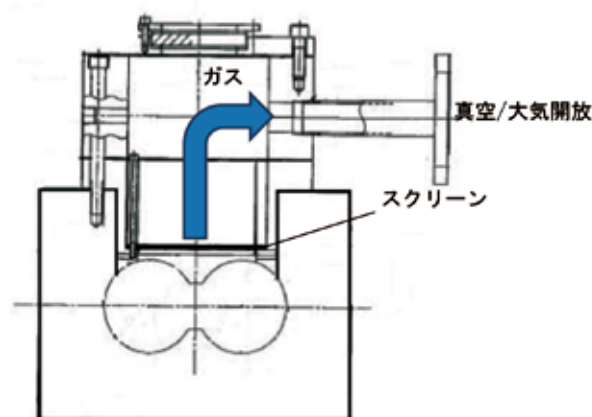



図 9 脱ガスシリンダ (DGC：De-Gassing Cylinder)

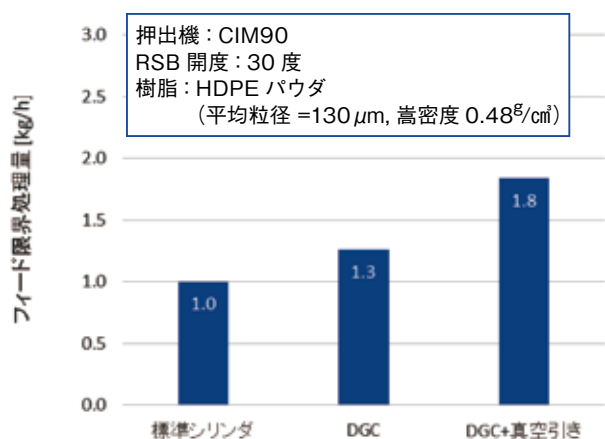



図 10　DGC と標準シリンダのフィード限界処理量の比較

4.2　新型 RSB による可塑化混練調整範囲の向上

1系列のポリオレフィンの重合プロセスにおいて、最終製品の用途に合わせて、粘度、機械強度などの特性が多様な銘柄を生産している。それら全ての銘柄を均一に可塑化混練するためには、二軸混練押出機が各銘柄に適した混練エネルギーを樹脂に充分与える必要が有る。二軸混練押出機では一般に、一定のスクリュ回転速度で処理量のみ増加させると樹脂の滞留時間は短くなり、二軸混練押出機が与えることのできる混練エネルギーは減少する。樹脂に充分な混練エネルギーを与えるために、混練調整機構の制御や、ギアポンプのサクション圧を調整するなどして、二軸混練押出機内での滞留時間を制御している。しかし、前述の特殊フィードシリンダや DGC を採用し処理量を更に増加させると、前記の調整では樹脂の可塑化に必要な混練エネルギーが不足する場合がある。そこで、従来型より混練エネルギーの調整幅が広範囲な新型 RSB を開発した。

この新型は、従来の RSB(5) の基本設計を踏襲し、従来の RSB に比べスクリュ部リングを小径とすることにより、スロットバーとスクリュに挿入されたスロットリングにより形成される軸直角断面流路を狭く、かつスクリュ軸方向のスロットリングとスロットバーの重なり部分を長くすることにより、RSB を閉じた状態で従来型よりも大きな圧力損失を発生させる形状とし、スクリュの可塑化混練部の樹脂充満長さをより幅広く調整できる構造とした。

CIM90 にて、新型 RSB と従来型 RSB の性能比較実験を実施した。実験は、原料に MI = 0.34（測定荷重= 5kg、測定温度= 190℃）の HDPE パウダを使用し、スクリュ回転速度は 400rpm の条件で実施した。二軸混練押出機のモータ消費動力を処理量で割った値である比エネルギー（以下、E_{sp}）を混練エネルギーの指標とした。E_{sp} の調整範囲を比較すると、従来型 RSB は 0.170 ～ 0.200kWh/kg（ΔE_{sp} = 0.030kWh/kg）に対し、新型 RSB は 0.170 ～ 0.260kWh/kg（ΔE_{sp} = 0.090kWh/kg）と約 3 倍の調整幅となった（図 11）。この新型 RSB は、同サイズの二軸混練押出機で処理量を増加させても従来型 RSB に比べて大きな E_{sp} を樹脂に付与することが可能となる（図 12）。

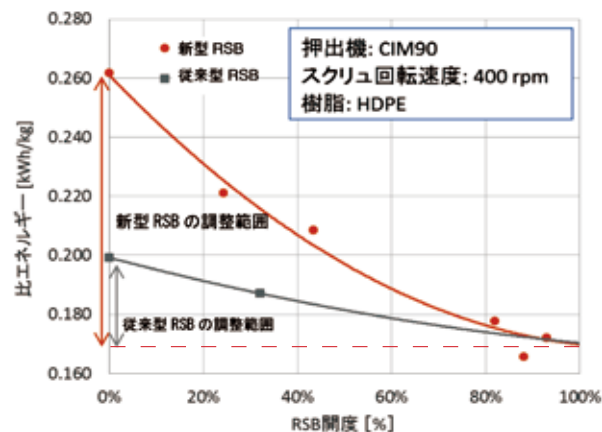



図 11　新型 RSB と従来型 RSB の混練能力調整範囲の比較

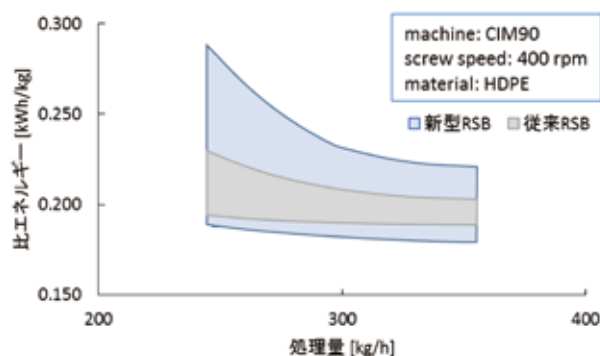



図 12　新型 RSB と従来型 RSB の処理量と比エネルギー調整範囲

4.3　Bi-modal 樹脂に対する混練能力の向上

Bi-modal HDPE は、前述のように双峰性の分子量分布を持ち、高分子量領域で強度と耐環境応力亀裂性を向上させ、低分子量領域で耐衝撃性や適度な柔軟性を確保させており、それらを均一に混練することで、樹脂本来の特性が発揮される。均一に混練された良好な樹脂製品を得るためには、混練部スクリュの頂部（以下、チップ部と称す）を通過する時に作用するせん断応力を最適化することが重要である。

チップ部の概念図を図 13 に示す。チップ部で発生するせん断応力τは式 (2) で表され、チップ部を平行溝と仮定すると圧力損失Δ P は式 (3) で表される。

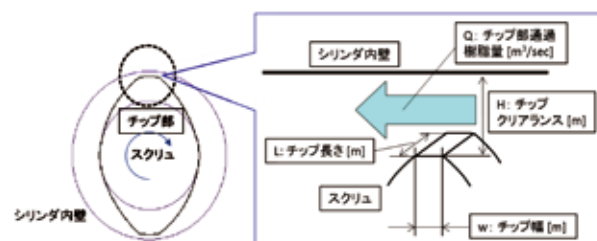



図 13　チップ部概念図

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \text{ [Pa]} \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

ここで、

η : 樹脂の粘度 ［Pa・sec］

$\dot{\gamma}$: せん断速度 $= \dfrac{\pi DN}{60H}$ [1/sec]

D : シリンダ内径 ［m］

N : スクリュ回転速度 [rpm]

H : チップクリアランス [m]

$$\Delta P = \frac{12\eta QL}{w \cdot H^3} \text{ [Pa]} \cdots\cdots\cdots (3)$$

ここで、

Q: チップ部通過樹脂量 [m^3/sec]

L: チップ長さ [m]

w: チップ幅 [m]

式 (2) より、チップ部のせん断応力τは一定のシリンダ内径、スクリュ回転速度、樹脂粘度において、チップクリアランスに依存する。チップクリアランスを大きくすればせん断応力は小さく、逆にチップクリアランスを小さくすればせん断応力は大きくなる。式 (3) より、チップ部の圧力損失Δ P は一定のチップ部通過樹脂量、チップ長さ、チップ幅においてはチップクリアランスに依存するが、実際には圧力損失によって通過樹脂量が変化する。この解析には、当社が独自に開発したシミュレーション技術を用い（図 14）、実証試験結果と併せて適正なチップクリアランスを採用している。

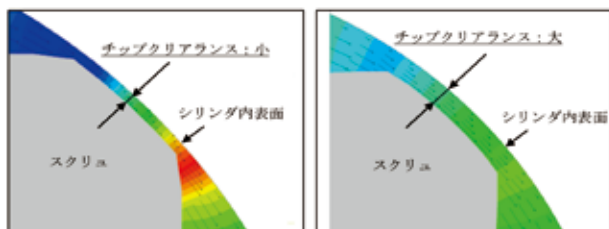



図 14　チップ部の圧力分布（赤色が高圧、青色が低圧）

樹脂の滞留時間は樹脂の混練度合いを調整する因子のひとつであり、E_{sp} は滞留時間 t を用いて以下の式 (3) で表される。

$$E_{sp} \propto k\eta\dot{\gamma}^2 t \left[\frac{kWh}{kg}\right] \cdots\cdots\cdots (4)$$

ここで、

t: 滞留時間 [sec]

k: 単位換算定数

式 (4) より、一定の運転条件でも滞留時間 t を調整すれば E_{sp} を変化させることが可能であり、CIM の場合、先に紹介した新型 RSB により、二軸混練押出機の樹脂流路容積を幅広く調整することで、滞留時間を容易に変化させることができる。このように CIM は、最適な混練スクリュの組み合わせとチップクリアランスの選定、幅広い滞留時間の調整により、優れた混練能力を実現している。

5.　造粒装置の高能力対応

二軸混練押出機の処理量を向上しても下流のギアポンプ、スクリーンチェンジャー、UWC などの造粒装置に付属する機器の処理性能が低ければ、システム全体の処理量は向上できない。そこで、次に造粒装置の高能力化について紹介する。

5.1　ギアポンプ

ギアポンプには駆動ギアが被駆動ギアを回転させる一軸駆動タイプと、二軸駆動タイプがある。当社のギアポンプは減速機内にタイミングギアを搭載した二軸駆動方式を採用しており、回転するギア同士は非接触なため、ギアは摩耗が無く信頼性が高い。また、ギアポンプの軸受には自社開発の耐摩材 N60 を使用した滑り軸受けを採用し、溶融樹脂を軸受けの潤滑媒体として、ギアポンプ排出側の少量の樹脂を軸受けとギア軸の隙間を介して吸入側へ戻す機構を採用している。

ギアポンプも二軸混練押出機に合わせて年々大型化が進み、100Ton/h 以上に対応した GP630TM の設計が完了している。プラント生産量に応じた多様なラインナップを図 15 に示す。2000 年に処理量が 50Ton/h 以上の PE 用 GP500T-M を製造・納入し、2013 年には処理量が 70Ton/h 以上の PP 用 GP560T-M を開発し、製造・納入した。

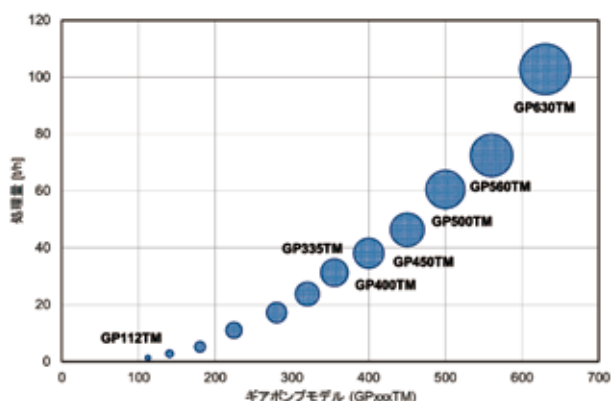



図 15　ギアポンプ GP-TM シリーズのサイズと処理量

5.2　スクリーンチェンジャー

溶融樹脂中の異物の濾過装置であるスクリーンチェンジャーも処理量増加に対応して年々大型化が進んでいる。当社が標準的に採用しているデュアルバースクリーンチェンジャーは生産運転中にスクリーン交換が可能である。

スクリーンの形式は平板型、円筒型、カートリッジ型の3 種類から選択可能で、かつプラント生産量に応じてスクリーンチェンジャーのサイズを選択可能な幅広いラインナップとしている（図 16、図 17）。中でも円筒型のスクリーンチェンジャーは、平板型に比べて 4 倍のろ過面積を有し、スクリーンの交換も容易なことから、1990 年代半ばより幅広い分野で使用されてきた。カートリッジ型のスクリーンチェンジャーは、ろ過面積の拡大と省スペース性を兼ね備え、最大サイズの NSC460DBW-C においては濾過面積が 23,000cm^2 以上で処理量 150Ton/h まで対応可能である。

図 16　スクリーンチェンジャーの種類

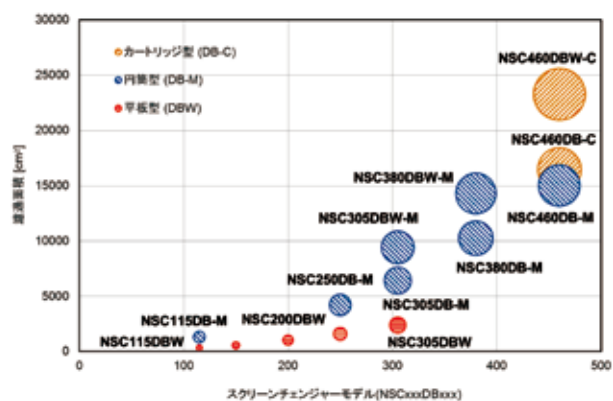



図 17　スクリーンチェンジャー NSC シリーズのサイズとろ過面積

5.3　UWC（水中カッティング装置）

UWC もプラント生産量に応じた機種をラインナップし、100Ton/h まで対応可能である（図 18）。UWC のダイプレート表面およびカッタ刃は TiC などの高硬度材料を適用している。

ダイプレートは、均一な形状のペレットを得るために重要な機器であり、通常加熱媒体にはスチームまたは熱媒油が用いられ、その熱媒の流路には樹脂ノズルを均一に加熱するために最適に配列されたヒートチャンネル構造を採用している（図 19）。

UWC は複数のカッタ刃を円周方向に取り付けたカッタホルダを搭載したカッタ軸を可変速モータにて駆動する（図 20）。形状・大きさの揃った、良好な形状のペレットを長時間安定して生産するためには、ダイプレートに対して適切なカッタ接触圧力を生産条件に合わせて維持する必要がある。当社の UWC は、生産条件に合わせてカッタ押圧を自動的に調整するため、生産条件の変更時等に生じやすい操作ミスによるカッティングトラブルの防止、不要な生産停止を防止することで、造粒装置としての信頼性の向上に貢献している。

UWC は台車に搭載されており、ダイプレートと完全に切り離すことが可能で、スタートアップ時の作業を安全かつ確実に実施することができる。スタートアップにおいては、造粒機を構成する各機械を適切なタイミングで起動させることが非常に重要となるが、当社は UWC の接続後に各構成機械が自動的に起動するオートスタート機能を標準で採用している。

UWC のオートスタートには２つの方式がある。溶融樹脂がダイスから吐出される前にペレット搬送水（以下、PCW）が UWC の水室に通水された状態で起動する水中スタートと、溶融樹脂がダイスから吐出されると同時に水室へ PCW を通水するドライスタートである。特に近年では、造粒機が大型化し、オペレータの背丈よりも高い位置から高温の溶融樹脂が排出されるため危険性が増しており、生産機に水中スタートが多く採用されている[6]。

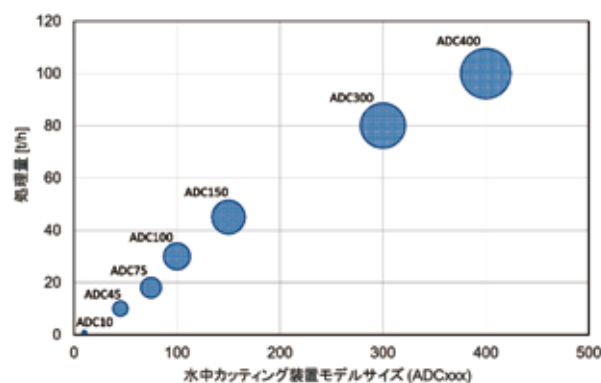



図 18　UWC 装置 ADC シリーズのサイズと処理量

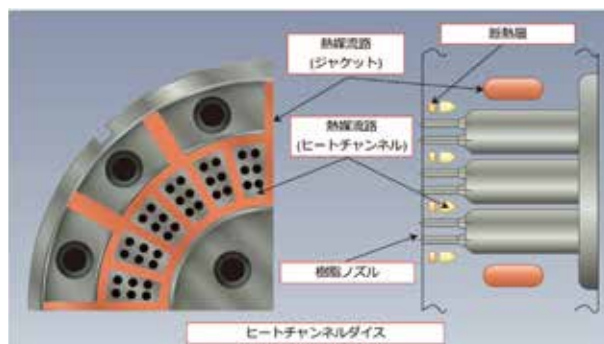



図 19　ヒートチャンネルダイスの模式図

図 20　UWC 装置 ADC300S

6. 結　言

造粒機性能向上の歴史は、生産量増加に対応するためのポリオレフィンプラントの大型化の歴史と言っても過言では無い。更なる大型化の市場要求に対し、お客様にご満足頂ける装置を提供する為には、構成機器の機能の効率を向上させ機械の処理量を最大限に引き出す技術開発が必要である。今後も市場のニーズに適合した技術開発に取り組む所存である。

参 考 文 献

(1) 経済産業省：世界の石油化学製品の需給動向（2014）
(2) 池谷　学等、日本製鋼所技報 No.61（2010）、P84
(3) 矢田　恭平等、特許第 5190500 号（2010）
(4) 柿崎　淳等、実用新案第 2585280 号（1992）
(5) 綿田　悟等、特許第 3004647 号（1999）
(6) 高本　誠二等、特許第 4955795 号（2010）

水中造粒機ダイプレート用新硬化材の開発

Development of a New Hard Material for the Under Water Cutter Die-plate

渡部　勇介 *
Yusuke Watanabe

福原　秀樹 *
Hideki Fukuhara

千村　禎 **
Tadashi Chimura

橋本　知典 **
Tomonori Hashimoto

澤村　洋平 ***
Youhei Sawamura

要　　旨

プラスチックの水中造粒機（UWC）に搭載されるダイプレートの長寿命化要求に応じるため、当社がこれまで培ってきた粉末焼結技術を利用した新硬化材を開発した。UWCダイプレートには、耐キャビテーション・エロージョン性およびカッター刃との摺動摩耗に対する耐摩耗性が要求される。そのため、これらの特性について開発材を適用したラボ試験並びにダイプレートを試作して評価した。その結果、開発材は当社ダイプレートの標準硬化材（JSW TiC）と比べて、同等以上の耐キャビテーション・エロージョン性と優れた耐摺動摩耗性を発揮するとともに、カッター刃の摩耗を抑制する効果を見出した。この結果から、開発材をUWCダイプレートに適用すれば、ダイプレートおよびカッター刃の長寿命化が期待される。

―― Synopsis ――

Responding to a demand of long life of the under water cutter die-plate, JSW has developed new hard material for the under water cutter die-plate using powder sintering technique. The new material has been evaluated by cavitation erosion tests and wear tests using not only equipment in labs but also the plastic pelletizing machine. According to the results, cavitation erosion resistance and wear resistance of new material were superior and/or similar to the properties of the JSW standard material (JSW TiC). In addition, the developed material decreases wear rate of cutter knives. Consequently, the new material is expected to make die-plates and cutter knives have longer life.

1. 緒　　言

近年、ポリエチレン（PE）やポリプロピレン（PP）といった樹脂ペレットを生産する大型造粒機の生産能力が増加し、時間当たり70トンを超える造粒機も稼動されるようになった。生産性向上のために、造粒機の運転効率を上げるには、ダイプレート周辺機器の消耗部品交換による停止期間を短縮することも効果的である。

そのため、当社では水中造粒機（UWC）に搭載されるダイプレート向け新硬化材の開発により周辺材料の長寿命化を目指しており、本報ではその内容について報告する。

＊：広島研究所
Hiroshima Research Laboratory
＊＊：広島製作所
Hiroshima Plant
＊＊＊：日鋼テクノ
NIKKO TECHNO CO.,LTD.

2. UWC ダイプレートおよびカッター刃について

図1に造粒機と周辺機器の構成を示す。原料はシリンダ内のスクリュで連続的に溶融・可塑化され、ダイプレートのノズル（図2参照）から押出される。その後、高速で回転するカッター刃によって長さ3～5mm に切断されペレットが生産される。

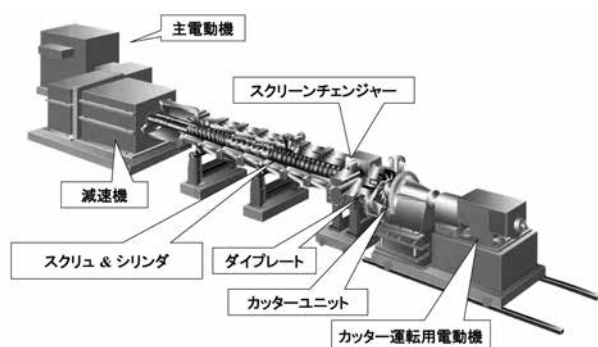



図1　造粒機と周辺機器の構成

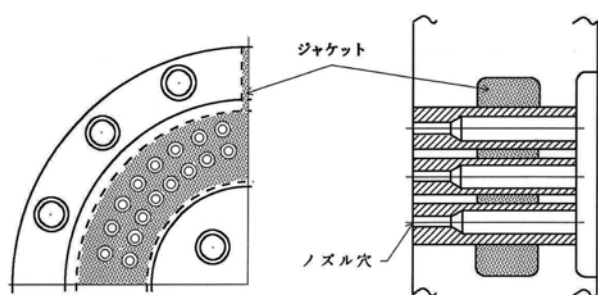



図2　ダイプレートのノズル断面形状

図3にダイプレート硬化材表面をカッター刃が摺動する様子を示す。UWC タイプの造粒では、溶融樹脂の切断は水中で行われるが、ダイプレート硬化材表面では高速回転するカッターが摺動するため、水中でのカッター刃の高速回転によって生じる多数の気泡が崩壊することで機器に壊食を引き起こすキャビテーション・エロージョン[1]及びカッター刃との摺動摩耗が生じる環境下にある。ダイプレート硬化材表面のキャビテーション・エロージョンや摺動摩耗が進行すると、良好なペレットが得られなくなるため、造粒装置を停止してダイプレート硬化材の研磨や補修あるいは交換が必要になり、生産性が低下する。

一方、カッター刃においても、ダイプレート硬化材との摺動によって摩耗が進行すると、良好な切断が困難になり、ペレットの品質の低下を招くため、カッター刃の交換が必要になる。時間当たり70トンを越える樹脂ペレットを生産する造粒機の場合、組み込まれるカッター刃の枚数は50枚を越えるため、カッター刃の交換は、運転停止による生産性の低下につながる。したがって、ダイプレートと同様にカッター刃の交換頻度の低減も強く望まれている。

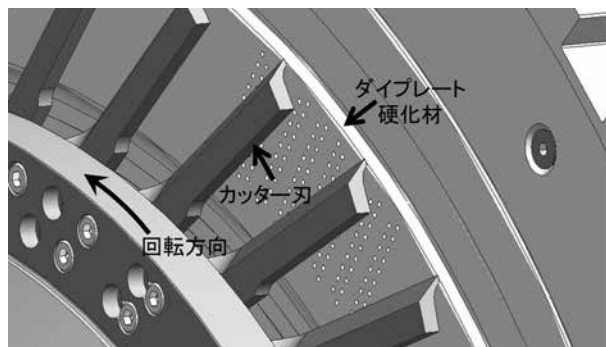



図3　ダイプレート硬化材をカッター刃が摺動する様子

3. ダイプレート硬化材の開発目的

このような背景から、当社のダイプレート硬化材には、耐キャビテーション・エロージョン性および耐摩耗性に優れた各種硬化材を採用しており、近年では、「JSW TiC」が標準採用されている。

JSW TiC は、鉄基の金属素地に高硬度（HV ≒ 3200）を有するチタンカーバイド（TiC）粒子を複合化させた金属基複合材料である。金属素地よりも顕著に硬度の高い粒子を複合させせることで、優れた耐摩耗性を発揮し、UWC ダイプレートの長寿命化を可能にしている。

しかし、硬質粒子の複合化は優れた耐摩耗性を発揮する一方で、摺動相手に対して攻撃性が強まる[2]。そのため、単に耐摩耗性の良い材料をダイプレート硬化材に適用した場合、ダイプレートの長寿命化が図られる反面、相手材であるカッター刃の摩耗に繋がるので、カッター刃への影響も考慮する必要がある。

ダイプレート硬化材の硬質粒子によるカッター刃への攻撃性の主要因としては、ダイプレート硬化材に含有する硬質粒子がカッター刃の摺動面を削るアブレシブ摩耗[3]の作用が考えられる。

アブレシブ摩耗では、硬質粒子の粒径によって相手材の比摩耗量が変化する、砥粒寸法効果が生じることが報告されている[4]。これは、複合材料の砥粒がある大きさ（臨界砥粒径）以上の場合、相手材の比摩耗量と粒径は無関係であるが、臨界砥粒径以下では小さい砥粒ほど相手材の比摩耗量が減少する効果である。

なお、比摩耗量とは、摩耗体積をすべり距離と垂直力で除した、単位距離及び単位荷重当たりの摩耗体積で、比摩耗量 = 摩耗体積 /（すべり距離・垂直力）で示される。

アブレシブ摩耗における砥粒寸法効果は、小さい砥粒程、相手材の摩耗を抑えられることを意味するため、小さな硬質粒子をダイプレートに均一に分散させることによって、相手材に相当するカッター刃の摩耗抑制効果が期待できる。

そこで、UWC ダイプレート及びカッター刃の長寿命化を実現するために、粉末焼結技術を用いて微小な硬質粒子を均一に分散させることを目指した UWC ダイプレート用新型硬化材の開発を行った。

4.　開発材の製造プロセス

図4に開発材の製造プロセスを示す。粉末の混合・粉砕は、所定の割合に配合した粉末を均一に混合させるとともに、混合した粉末粒子を粉砕することを目的とした工程である。開発材においては、硬質なTiC粒子の粉砕と微細化並びに各種金属粉末との均一な混合を達成するため、時間や雰囲気、温度といった種々の条件について検討した。

粉末の分級は、混合・粉砕された粉末を所定の粒度にそろえる工程であり、粉末固化成形は、分級を終えた粉末を適当なゴム型に充填・封入し、冷間等方圧加圧法によって固化成形する工程である。この工程では、焼結過程で発生するガスを成形体から排出させること及び適度な強度の成形体が得られることを満足できる条件が選ばれている。

最終的に得られた成形体は真空炉を用いて焼結される。真空焼結は、大気中の酸素等の影響による品質悪化を抑えるためである(5)。

図4　開発材の製造プロセス

5.　開発材のミクロ組織

写真1に開発材およびJSW TiCのミクロ組織を示す。両材とも硬質のTiCが金属素地に分散しているが、JSW TiCのTiC相は金属素地中に霜降り状に入り込んでいるのに対して、開発材のTiC相は微細で金属素地全体に均一に分散している。

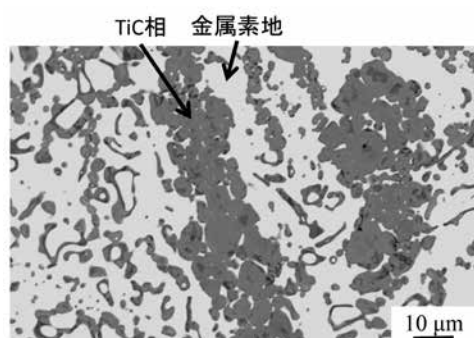
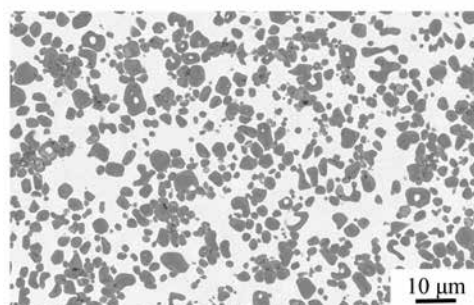



写真1　開発材およびJSW TiCのミクロ組織

6.　ラボ試験による開発材の性能評価

ダイプレート硬化材表面では、水中環境下でのカッター刃の高速回転によって、キャビテーション・エロージョンが発生する場合があるため、ダイプレート硬化材にとって耐キャビテーション・エロージョン性は重要である。そこで、開発材の耐キャビテーション・エロージョン性の評価を行った。

6.1　キャビテーション・エロージョン試験

キャビテーション・エロージョン試験の評価は、JIS R 1646:2002に準じて行った。図5に耐キャビテーション・エロージョン評価に用いた試験装置の模式図を示す。本装置は対向型磁わい振動試験装置であるので、振動子の振動によって、水中に浸漬したホーンの先端から発生した気泡を試験片表面に衝突させることで、試験片にキャビテーション・エロージョンによる損傷を生じさせる仕組みである。

表1に試験条件を示す。試験片とホーン先端との距離は0.4mmと狭いため、キャビテーション・エロージョンの生じる様子は目視で観察できない。

耐キャビテーション・エロージョン性は、試験材の質量減少量と試験材のかさ密度から算出された体積減少量をもとに評価した。

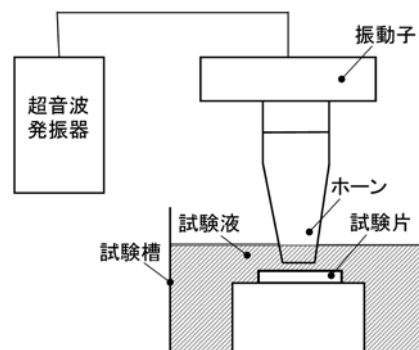



図5　耐キャビテーション・エロージョン評価試験装置

表1　耐キャビテーション・エロージョン試験条件

材質	JSW TiC、開発材
試験片サイズ	30 × 30 × 5 mm
試験時間	24h
共振周波数	18kHz
全振幅	30μm
試験液	イオン交換水（室温）
ホーンと試験片の隙間	0.4mm

図6にキャビテーション・エロージョン試験による試験材の体積減少量、写真2に24 h試験後の試験片外観を示す。

JSW TiC材と開発材を比較した結果、図6に示すように、開発材はJSW TiC材よりも試験時間毎の体積減少量が若干小さく、写真2に示すように試験後の損傷面に大きな違いは見られなかった。以上の結果から、開発材の耐キャビテーション・エロージョン性はJSW TiCと同等以上であると分かった。

図6 試験片の体積減少量曲線

(a) JSW TiC (b) 開発材

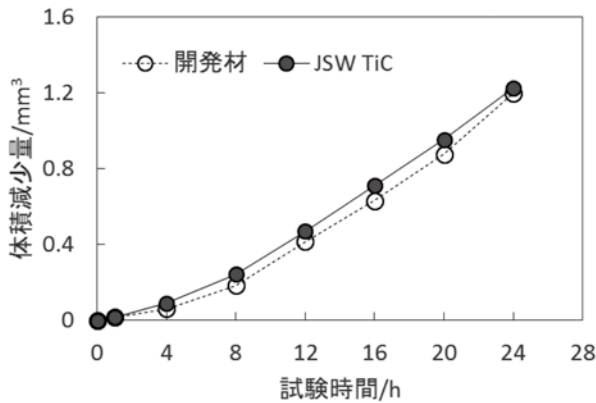
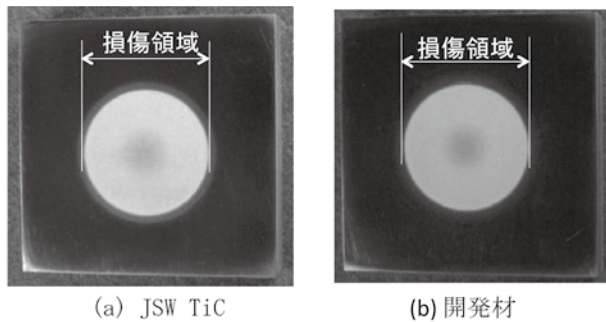



写真2 試験24h後の試験片外観
(試験片表面サイズ: 30 × 30 mm)

6.2 摺動摩耗試験

ダイプレート硬化材はカッター刃との摺動摩耗を生じるので優れた耐摩耗性が求められる。そこで、カッター刃との摺動摩耗試験により開発材の耐摩耗性評価を行った。

開発材の摺動摩耗に対する評価は、カッターオンディスク摩耗試験により行った。図7に摺動摩耗試験の模式図を示す。本試験は摺動摩耗試験機を利用してダイプレート硬化材と2枚のカッター刃との摺動を模擬するもので、高速に回転させたダイプレート硬化材を想定したディスクにカッター刃を一定荷重で押し付けて摺動摩耗を生じさせるものである。

試験に使用したカッター刃は当社製カッター刃JSW-CRA、ディスク側の材料には開発材及びJSW TiCを用いた。ディスク試験片(ϕ 60 × 6 mm)には、実際のダイプレートのノズルを模して、ϕ 2.5の貫通穴が同心円上に加工され、実際のダイプレート硬化材と同じ表面粗さに仕上げられている。

材料の耐摩耗性は、材料の硬度と密接に関係があることが知られているため、ディスクに用いたJSW TiCおよび開発材の硬さは、熱処理によって同程度に調整した。

表2にカッター刃との摺動摩耗試験条件を示す。摩耗試験においては摩擦速度、接触圧力などによって摩耗量が変化するため、ダイプレート硬化材の耐摩耗性評価は実機と同様の摩擦条件で試験を行うことが望ましい。そこで、本試験でのカッター刃とディスク表面との接触圧力及び摩擦速度は実機の運転条件を参考に設定した。

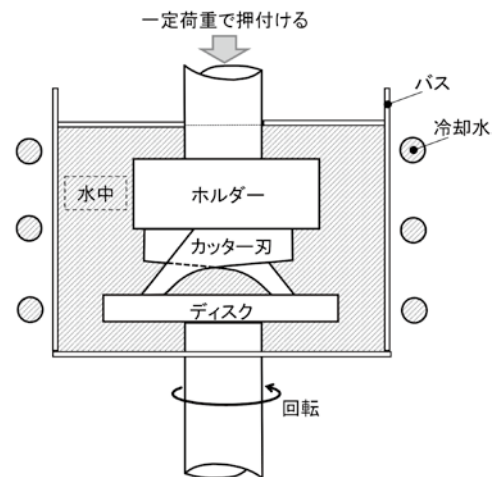



図7 摺動摩耗試験の模式図

表2 カッター刃との摺動摩耗試験条件

試験片	ディスク側	開発材
		JSW TiC
	カッター刃側	JSW-CRA
試験条件	接触面圧	127 MPa
	ディスク回転数	2500 rpm
	試験時間	10 h
	試験環境	水中

図8にディスクの摩耗体積、図9にカッター刃の摩耗体積を示す。図9のカッター刃の摩耗体積は、2枚のカッター刃の平均値を示している。図8から開発材ディスクの摩耗体積は、JSW TiCの約半分であった。一方、図9から開発材ディスクと組み合わせたカッター刃の摩耗体積は、JSW TiCディスクと組み合わせたときの約1/3であった。

以上の結果から、開発材はJSW-CRAカッター刃との組み合わせた摺動摩耗において、JSW TiCとJSW-CRAカッター刃の組み合わせよりも耐摩耗性が優れており、カッター刃の摩耗抑制効果も期待できると分かった。

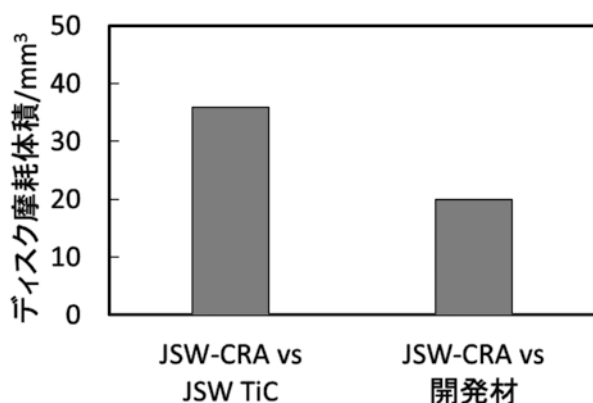



図 8　ディスクの摩耗体積

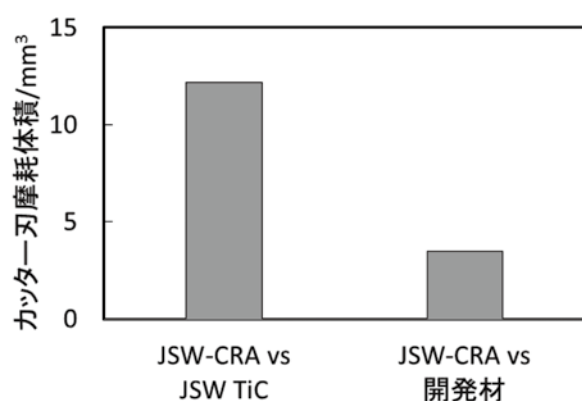



図 9　カッター刃の摩耗体積

7.　開発材ダイプレートによる実機造粒テスト

前項の試験から、開発材はJSW TiCと比べて耐キャビテーション・エロージョン性においては同等以上、JSW-CRAと組み合わせた摺動摩耗性においては、非常に耐摩耗性が優れていた。

そこで、実際に開発材をダイプレート硬化材に適用した小型ダイプレートを造粒機先端に取り付けて、カッティング性などを検証する実機造粒テストを行った。

7.1　実機造粒テスト方法

写真 3 に造粒機に製作したダイプレートが取付けられた状況を示す。今回のテストは当社の樹脂技術開発センターに設置されている造粒機（CMP69）を使用した。テストに使用した樹脂はMI（溶融指数）(6) =30のPP、処理量は約200 kg/h、カッター刃（1組4枚）は前述した摩耗試験と同じJSW-CRAとした。カッター刃の回転速度やカッター刃とダイプレートとの接触圧力などの条件は、実際の運転条件を参考にした。

なお、今回のテストでは、JSW TiCの硬化材を適用したダイプレートも比較用に製作して、前述と同様の条件にて実機運転テストを行った。両ダイプレートの性能評価は、ダイプレート及びカッター刃の摩耗量並びに造粒後に回収されたペレットの外観や重量などをもとに比較した。

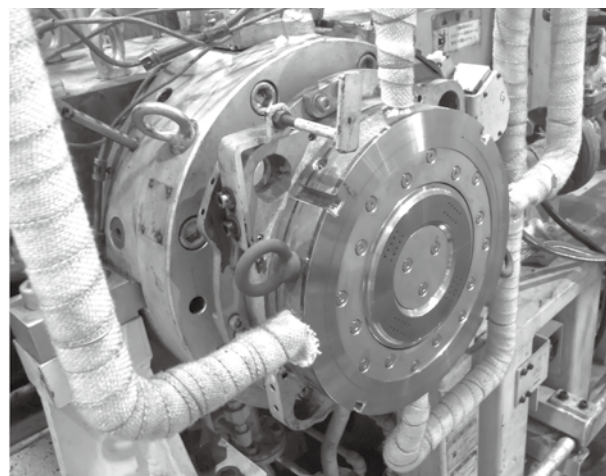



写真 3　造粒機にダイプレートが取付けられた状況

7.2　実機造粒テスト結果

図 10 にテスト後のカッター刃の摩耗量を示す。測定値はカッター刃 4 枚の平均値である。その結果、開発材ダイプレートとの組み合わせにおけるカッター刃の摩耗量は、JSW TiC ダイプレートとの組み合わせと比べて約半分であった。この結果はラボ試験の摩耗量より大きいが、効果は認められた。一方、ダイプレートの摩耗量については、両者とも非常に小さいため計測されなかった。この結果から、開発材ダイプレートはJSW TiC ダイプレートと比べ、耐摩耗性は同等以上であり、また、組み合わせてテストに使用されたカッター刃の摩耗量が小さかったことから、摺動摩耗試験と同じ傾向が得られた。

写真 4 にテストで得られた樹脂ペレットの外観を示す。開発材ダイプレートで得られたペレットの大きさや形状は、JSW TiC ダイプレートのペレットと同等であることから、開発材ダイプレートは当社標準のJSW TiC ダイプレートと同様のペレットが生産できるといえる。

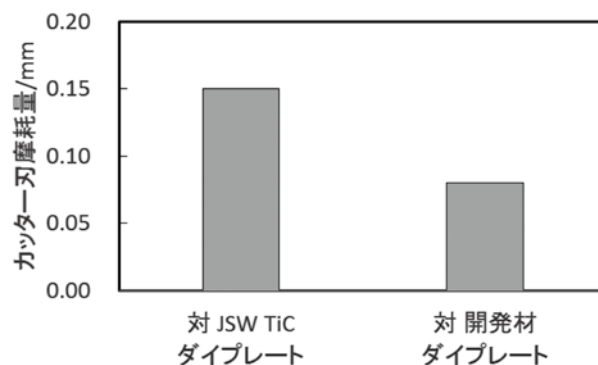



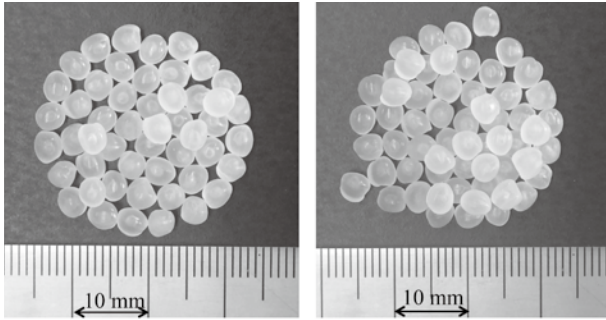
図 10　テスト後のカッター刃摩耗量

(a) JSW TiCダイプレート (b) 開発材ダイプレート

写真4 実機テストで得られたペレット

8. 結 言

当社の粉末焼結技術を用いてUWCダイプレート硬化材用に新材料を開発し、カッター刃との摺動による耐キャビテーション・エロージョン性及び耐摩耗性の評価並びに開発材を適用したダイプレートの実機テスト結果について報告した。

開発材は、当社カッター刃のJSW-CRAと組み合わせた摺動摩耗に対して優れた耐摩耗性を示すとともに、開発材を適用したダイプレートはJSW-CRAと組み合わせることでカッター刃の摩耗抑制効果が発揮されることを見出した。したがって、開発材の適用によりダイプレート及びカッター刃の長寿命化が図られることで、造粒機の生産性向上に貢献できると考える。

今後も、耐摩耗性、耐キャビテーション・エロージョン性等、各種特性に優れた機械材料の研究・開発を進めていくことで、造粒機をはじめ樹脂製造機械の信頼性や生産性の向上に貢献できるよう努めていく所存である。

参 考 文 献

（1）松村昌信，磯本良則，矢吹彰広：エロージョン - コロージョン入門，(2005)，p.11，日本工業出版株式会社 .
（2）山田銑一：ユーザーのための金属基複合材料，(2006)，p.9，丸善株式会社 .
（3）笹田直：摩耗，(2008)，p.1，株式会社養賢堂 .
（4）笹田直：摩耗，(2008)，p.142，株式会社養賢堂 .
（5）中村雅知："金属粉末真空焼結炉"，電気製鋼，Vol.61，No.3 (1990)，pp.208-218.
（6）高分子学会高分子辞典編集委員会編：新版高分子辞典，(1988)，p.456，高分子学会 .

溶融微細転写® プロセスの高精度化と生産性向上

The Melt Transcription Molding Process with Higher Precision and Productivity for Thin Thermoplastic Products with Micro-and Nano-structured Surface

博士（工学） 焼本　数利
Dr. Kazutoshi Yakemoto

博士（工学） 伊東　宏
Dr. Hiroshi Ito

内藤　章弘
Akihiro Naito

越智　昭太
Shota Ochi

古木　賢一
Kenichi Furuki

原　政樹
Masaki Hara

要　　旨

微細形状を有する樹脂製品は、細胞培養デバイス、生体分子センサー、超撥水･超親水性素材、光学素子等に幅広く適用が可能である。当社は、溶融樹脂を型に塗布し、加圧成形する「溶融微細転写®法」を開発してきた。本工法は、多様な樹脂を用いて、100μmからの薄肉成形と、数十nm～数百μmサイズの高品質な微細形状を成形できる。しかし、成形サイクルは1分以上を要していた。そこで、微細加工製品の市場を拡大していくために、以下の方策で、サイクル時間の短縮を検討した。

(1) 新開発の塗布用ダイ、(2) 塗布樹脂の厚み制御、(3) 加圧成形方法、(4) 高速での樹脂塗布。

この結果、2mm厚のポリカーボネート樹脂 (PC) 製の成形品では、型温145℃でサイクル時間37.7sを達成した。

── Synopsis ──

Thermoplastic devices with fine surface topography are unlimitedly applicable, such as cell culture, sensors of bio-molecules, hydrophilic/hydrophobic surfaces, and/or optical devices. To produce micro- and nano-structures in high grade, we developed a melt transcription molding (MTM) process. It consists of plasticizing, coating molten polymer on a mold stamp, compressing and releasing from the mold. We have shown that MTM is effective to mold thin products (≧100μm) with the fine patterns from nanometers to micrometers scale with high aspect ratio (ASP) up to 20. However, the issue was the cycle time is still long. In this study, we developed shortened cycle time while keeping high transcription performance using the following methods:

(1) A newly developed die, (2) A thickness control of coated polymer, (3) A new compression molding process, (4) High speed coating.

These methods enabled to mold 2 mm thickness products of polycarbonate (PC) at the stamp temperature 145 ℃, and it could be released at the same temperature. As a result, heat and cool of stamp was eliminated, and the shortest cycle time 37.7 s was attained.

広島研究所
Hiroshima Research Laboratory

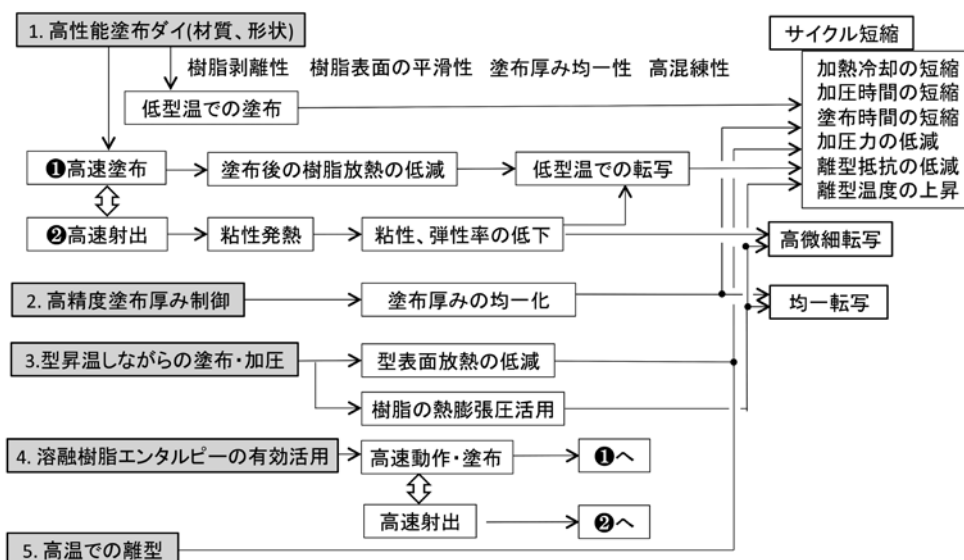
1. 緒 言

製品にnm～μmの微細形状を加工する技術は、様々な分野で応用が進んでいる[1]。ライフサイエンス分野では、フィルム表面に形成した数十nmから数百nmの凹凸を利用したウイルスやがん細胞の捕捉をはじめ、μmからmmの流路からなるマイクロ流体チップを用いた迅速・高感度の病理診断などが挙げられる。光学分野では、数十nm～数百nmの凹凸からなる無反射構造を用いた高効率の太陽電池、高画質の液晶パネルおよび高輝度の有機ELなどが挙げられる。さらに、自動車窓ガラスの超撥水加工、ウエアラブルな機器などに応用が進んでいる。これらの実用化は、人々の安全、健康および福利に貢献すると期待できる。同時に、樹脂製品の高付加価値化を促し、樹脂成形加工業界の発展に寄与するものと考える。

当社は、汎用樹脂からスーパエンプラにいたる多様な熱可塑性樹脂を用いて、溶融樹脂が本来有する流動性、濡れ性および低弾性率を最大限に活かすことにより、高い微細転写性を実現する「溶融微細転写®プロセス」を開発した[2]。本工法は、溶融樹脂を、型の隅々の微細凹凸に、ダイを接近させて直接均一に塗布し、その後加圧転写するものである。本工法により、幅または径が、数十nmから数百μm、アスペクト比（ASP=高さ/[幅・径]）は20に至る高品質の微細形状を、1分台のサイクル時間で成形できるようになった。また、成形品厚さは、成形品のサイズにもよるが、射出成形はできない100μmの薄肉から、5mmの厚肉まで実証した[3～5]。本工法は、従来の工法ではできない高品質の微細形状を要する医療・バイオ関連部品や、光学素子に適用が検討されてきている。ただし、課題として、生産性が挙げられる。サイクル時間は、最短でも90sを要していた。これは、微細形状の高い転写性を得るために、型の加熱冷却、加圧、微細凹凸を損わない円滑な離型に時間を要したことによる。今後、微細加工製品の用途・市場を拡大していくためには、高度な微細転写性を確保しながら、生産性を向上し、経済性を高めていくことが不可欠である。そこで本報では、本工法の特長をさらに伸ばしながら、サイクル時間を短縮する方法を検討した。

2. 溶融微細転写の生産性向上と高微細転写との同時満足への方策

溶融微細転写の特長である高い微細転写性および薄肉の成形性と、成形サイクルの短縮とを同時に満足させるための基本的な方策を表1に示す。第一に、高性能の塗布用ダイにより、樹脂とダイとの剥離性を高め、樹脂表面の平滑性を向上する。これにより、できる限り低い型温で、かつ高速の塗布で高品位の塗布樹脂を得る。第二は、塗布樹脂の厚み分布の均一性を高めることにより、加圧力を低減し、加圧時間を短縮する。第三は、型からの放熱を低減すると同時に、溶融樹脂のエンタルピーや熱膨張圧を有効に活用することで、型温を低くしながら高い転写性を確保する。これにより、転写時の型温を低くし、加熱冷却時間を短縮する。第四は、以上によって離型抵抗を低減し、高温で離型（冷却時間を短縮）することである。以下に、実証結果を説明する。

表1　サイクル短縮と高微細転写性との同時満足への方策

3. サイクル短縮方案の実証

3.1 高性能塗布用ダイとその効果

図 1 は、塗布用ダイの構成を示す。高い微細転写性と高生産性との両立を図るためには、①できる限り高速かつ低い型温で塗布し、②表面平滑性、厚み均一性および清浄性（コンタミ防止）を高める必要がある。下型の微細凹凸スタンパー（以下、下型）に溶融樹脂を塗布することで、型の隅々に高温の溶融樹脂を直接供給するため、特に下型に接する樹脂の下面では、極めて高い転写性を得ることができる。一方、その反対面（上面）は、塗布後に大気に接して放熱し、わずかに表面温度が下がる。このため、上面の表面平滑性を確保（凹凸を低減）することは、後工程の加圧転写（凹凸を潰す）に要する時間の短縮、および加圧力の低減による離型時間の短縮のために重要となる。また、厚みの均一性は、同様な理由から、加圧転写時間を短縮し、できる限り高温で離型できるために必要である。

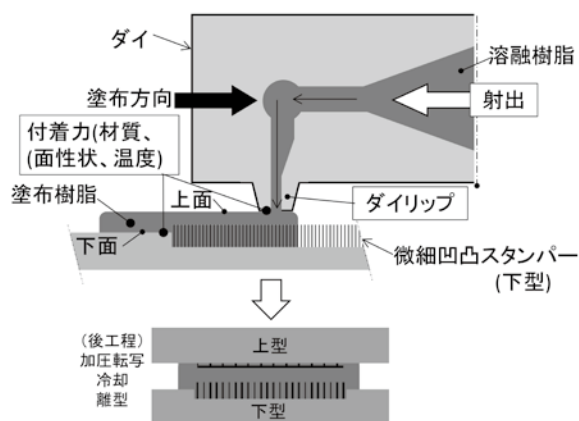



図 1　塗布用ダイの構成

表 2　従来のダイと高性能ダイを用いての塗布樹脂の表面粗度 R_a の比較

	スタンパー温度	
	160℃	130℃
従来ダイ	1.60	7.01
高性能ダイ	0.62	0.61

・単位 μm
・Ra は測定値高さの算術平均 $R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i|$
・使用樹脂：PC(ガラス転移点144 ℃)
・溶融樹脂温度：275 ℃

溶融樹脂を下型に塗布するためには、溶融樹脂とダイリップとの間での塗布方向のせん断変形抵抗が、樹脂と下型との間でのせん断方向の付着力よりも小さいことが必要である。従来は、下型を樹脂のガラス転移温度より高く設定し、樹脂と下型との付着力を高くしていた。しかしこれでは、型を冷却することが不可欠となり、サイクル短縮が制約を受ける。

そこで、本報では、ダイリップの材質と形状を改善することで、前記せん断変形抵抗を低減し、塗布樹脂の平滑性を向上させることにより、より低い型温で塗布できるようになった。表 2 は、従来のダイと高性能ダイとを用いて、樹脂温度 275 ℃、型温 130 ℃～160 ℃の条件下で、PC 樹脂（ガラス転移温度Tg＝144 ℃、MFR=63 g/10min [300 ℃、1.12 kg、ISO1133] ）を、塗布速度 5 mm/s で厚さ 0.2 mm に塗布した樹脂の表面粗度（R_a）を示す。図 2 は、塗布樹脂表面のレーザ顕微鏡写真である。従来の T ダイに比べて、格段に表面平滑性を向上できた。また、下型の温度が、樹脂のガラス転移温度（144 ℃）よりも低い 130 ℃でも良好に塗布できることを確認した。

(a)従来ダイ　Ra=7.01

(b)改良ダイ　Ra=0.61

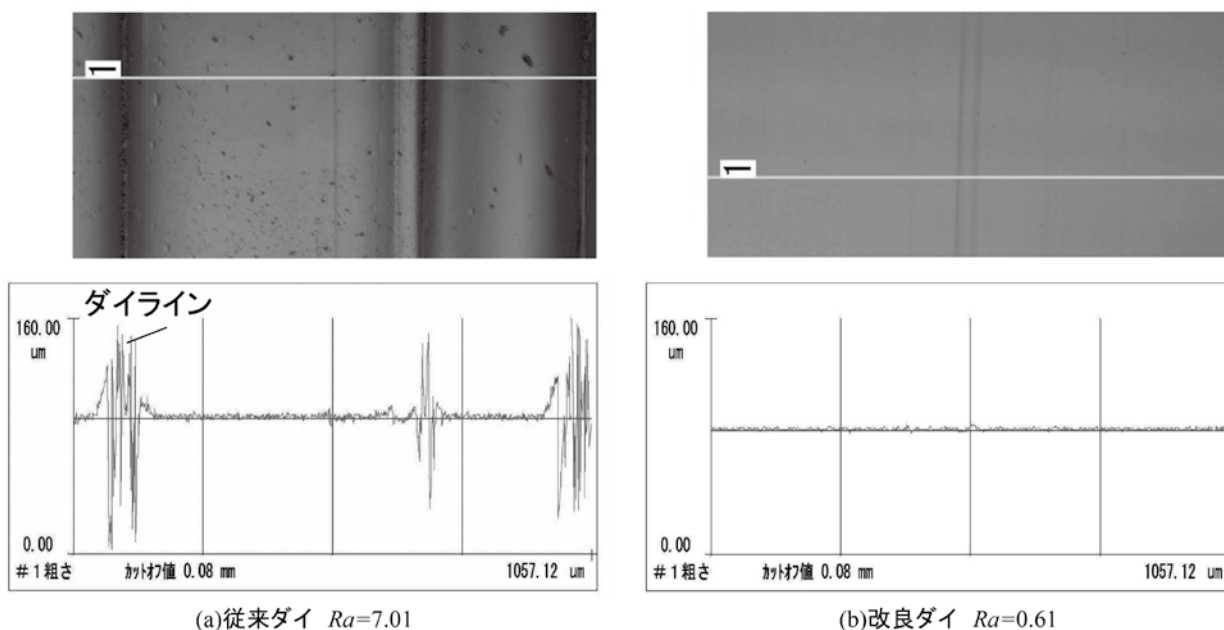



図 2　塗布した樹脂（PC）の表面粗度観察結果（下型 130 ℃、厚さ 0.2 mm、塗布速度 5 mm/s、樹脂温度 275 ℃）

3.2 高精度の塗布樹脂厚み制御

塗布樹脂の厚み分布が均一であるほど、加圧力と型温を低くでき、加圧時間、型の加熱冷却時間を短縮できる。塗布樹脂の厚み分布は、射出樹脂量と塗布速度等に依存する。

塗布樹脂の幅 W (m)、厚さ h (m)、塗布速度 vx (m/s) と、樹脂射出速度 vs (m/s)、射出スクリュの断面積 As (m^2) との間には、定常状態では W·h·vx = As·vs の関係がある。しかし、実際に吐出される樹脂の射出速度と、前記の射出速度 vs との間には差が生じる。これは、樹脂の圧縮性等に起因する。特に、射出と塗布の開始時点では、実際の樹脂射出速度と樹脂厚みは、過渡的な変化を示す。そこで、図 3 に示すように、塗布開始前に (vx=0 m/s 時点)、あらかじめスクリュを所定量 (以下、予圧ストローク) 前進させ、ダイ内の樹脂を圧縮して昇圧した後、塗布を開始した。さらに、初期の塗布速度 vx は、一定の加速度で、徐々に設定速度まで上昇させた。

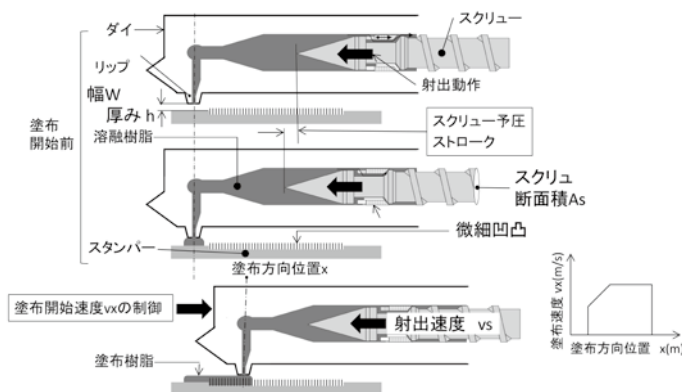



図 3　塗布開始時の動作

図 4 は、PMMA (ポリメタクリル酸メチル樹脂、Tg= 90 ℃、MFR =35 g/10min [230 ℃、37.3 N、JIS K 7210]) を用いて塗布、加圧成形した厚さ 0.1 mm の成形品の厚み分布を示す。80 mm × 100 mm の範囲で、厚み分布はレンジで 3 μm を得ている。図 5 は、PC 樹脂を用いて、厚み 0.22 mm の塗布のみの樹脂を作製し、予圧ストロークと、厚み分布との関連を確認したものである。予圧ストロークを 7 mm以上とすることで、厚み分布 10 μm 以下を得た。

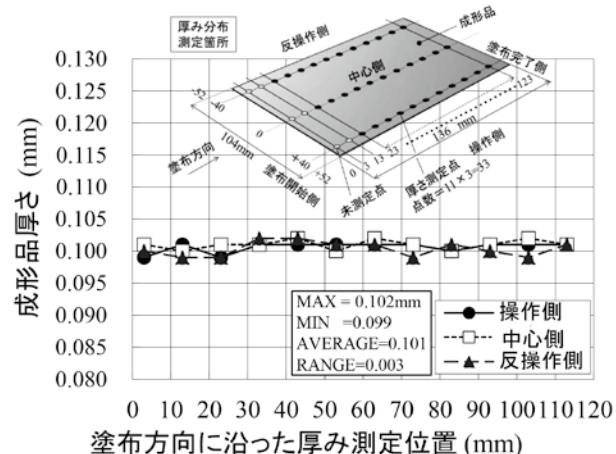



図 4　PMMA 樹脂成形品の厚み分布 (樹脂温度 250 ℃、型温 150 ℃、塗布速度 10 mm/s、加圧力 10 MPa)

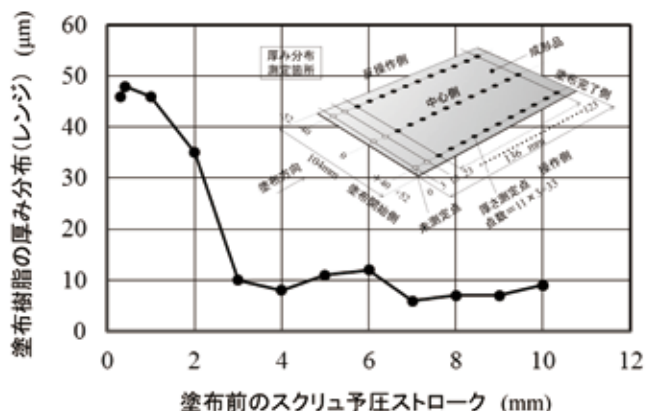



図 5　塗布した PC 樹脂の厚み分布と予圧ストロークとの関連 (樹脂温度 250 ℃、型温 175 ℃、加圧無し [塗布のみ] 塗布樹脂厚み 0.22 mm、塗布速度 22.8 mm/s)

3.3 熱膨張を活用した加圧成形

溶融微細転写では、従来、型を設定温度まで昇温した後に、下型に溶融樹脂を塗布して加圧成形していた。しかし、樹脂を塗布できる範囲で、可能な限り型が低温 (設定温度に向けて昇温中) の段階で樹脂を塗布し、加圧成形する方式とした。その目的は、①塗布樹脂が型表面を被覆し、型を閉じた状態て昇温することにより、型表面の放熱を低減する、②樹脂を加圧しながら型を昇温することにより、樹脂の熱膨張による圧力上昇を型の隅々に生じさせ、微細凹凸に均一に充填する、③塗布工程を前倒しして、サイクル時間を短縮することである。

図 6 は、樹脂の熱膨張を活用した均一転写の概念を示す。樹脂は、温度と変形速度に応じて粘性と弾性を発現する。型温を比較的に高くすると粘性の割合が増大し、流動性も高くなるので、加圧時には粘性流動による凸型の圧力勾配が現れやすい。これは面内の転写性を不均一にしやすい。逆に、型温を低くすると弾性的となり、圧力分布は均一となるが、微細な凹凸への充填性が低下する。一方、熱膨張は、型表面に接し加熱される全ての部位で均等に発生し、均一な圧力を発生できる。図 7 は、樹脂の熱膨張を活用した均一・高転写とサイクル短縮との両立を、従来のサイクルと比較して示す。図 8 は、本手法を PS 樹脂の成形に適用した場合の工程を示す。転写の下型設定温度 166 ℃に対し、塗布は 130 ℃で開始した。その結果、従来の成形サイクル 90 s を 75 s に短縮できた。図 9 は、図 8 の成形工程で得た 14 個のチップの転写率とショット変化を示す。成形品の厚みは 0.4 mm である。熱膨張圧の活用により、14 個の全チップで約 99%以上の転写率が得られた。

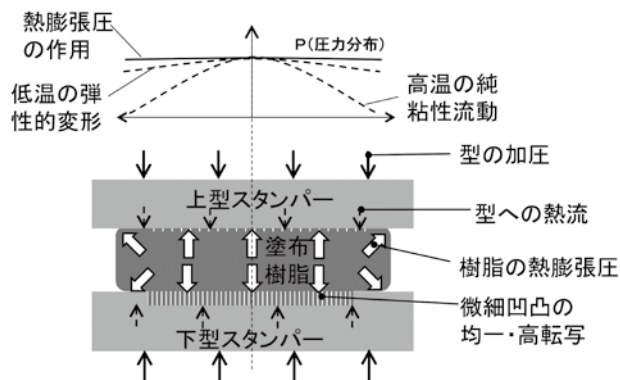



図6　樹脂の熱膨張圧を活用した均一・高転写の概念

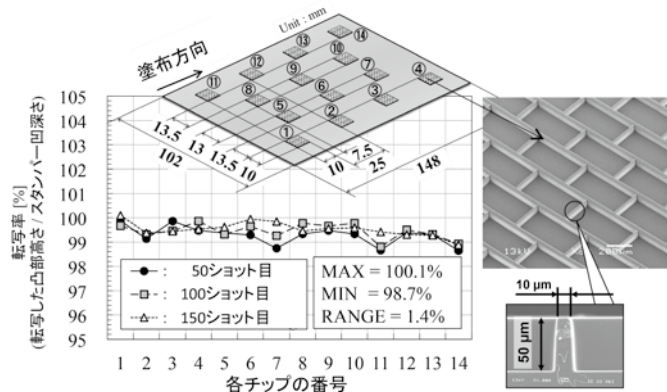



図9　PS樹脂成形品の微細凹凸チップ14個取りの転写率とそのショット変化[3]（幅10μm、高さ50μm、ASP=5）

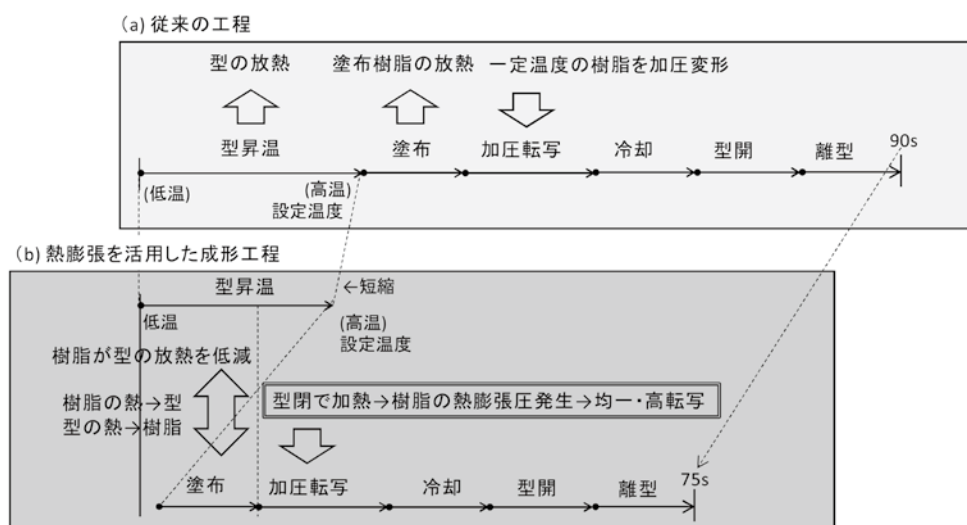



図7　樹脂の熱膨張を活用した均一・高転写の促進とサイクル短縮

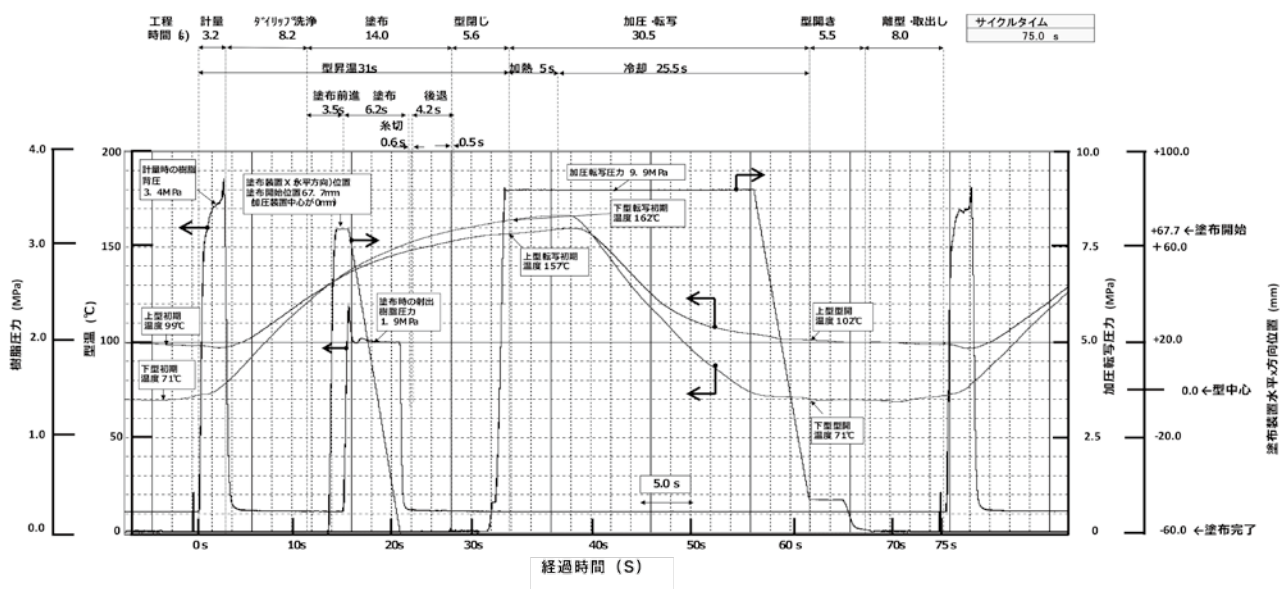
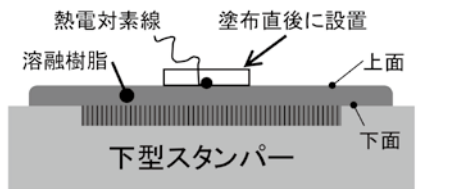



図8　樹脂の熱膨張圧を活用したPS樹脂成形（図9）のサイクル時間構成

3.4 溶融樹脂エンタルピーの有効活用

本工法は、可塑化した300 ℃前後の溶融樹脂を、150 ℃前後の型の隅々にダイから直接供給する。このため、溶融樹脂の流動性と低弾性を活かして、前節の通り高アスペクト比の微細形状を成形できた。ここからさらにサイクル時間を短縮するため、溶融樹脂のエンタルピーを効率的に成形に活用する方法を考える。溶融樹脂を塗布すると、樹脂から型への熱伝導により、時間の経過とともに樹脂温度は型温まで低下する。しかし、塗布後に迅速に加圧すれば、加圧開始時の樹脂温度が高くなり、その流動性と低弾性を活かして、低温、低圧かつ短時間の加圧で成形できる可能性がある。

そこで、塗布した後の経過時間と樹脂温度との関連を、φ0.1 mmのK型熱電対による計測と一次元平板の伝熱計算で求めた。計算モデルは、塗布した下面は型温度に等しく、上面は断熱の境界条件とした。図10は、(a) 計測方法、(b) 伝熱計算式、および (c) 計算のための樹脂熱物性データを示す。熱電対は、樹脂を塗布した直後に貼り付けたが、計測値が得られるには塗布開始から20 sを要した。この条件下で、塗布速度を100 mm/sで成形を行い、サイクル時間を確認した。塗布樹脂の厚さは、2 mmと0.2 mmに設定し、PC樹脂（Tg=144℃、MFR=63 g/10min［ISO1133、300℃、1.2 kg］）を用いた。樹脂温度は300 ℃、型温（下型）は150 ℃設定である。

(a) 計測方法

(b) 片面断熱の平板モデル

(c) 平板モデルの樹脂熱物性値

変数	単位	PC樹脂	下型(STAINLESS)
熱伝導率 λ	W/(m·K)	λ_1 = 0.26 (210 ℃)	λ_2 = 20.0 (200 ℃)
密度 ρ	kg/m³	ρ_1 = 1.12×10³ (207.1 ℃、0.1 MPa)	ρ_2 = 7.75×10³ (200 ℃、0.1 MPa)
定圧比熱 cp	J/(kg·K)	cp_1 = 2.039×10³ (205 ℃)	cp_2 = 0.46×10³ (20 ℃)
熱拡散率α λ/(ρ·cp)	m²/s	α_1 = 0.114	α_2 = 5.6

図10　塗布した後の樹脂温度変化の計算モデル

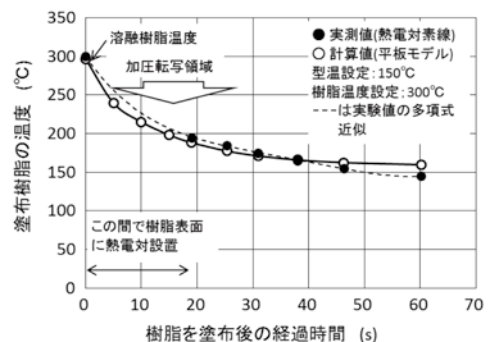
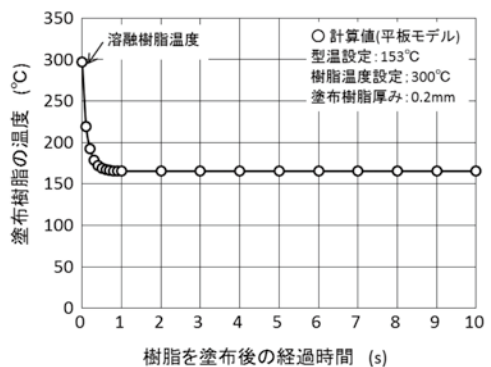
図11 (a) は、厚さ2 mmの場合の結果を示す。300 ℃の溶融樹脂を塗布した後、約60 sで150 ℃まで温度低下した。計測値と計算値とは概略の傾向は一致した。実際は断熱境界ではなく大気放熱があるにもかかわらず、5 sの時点で実測値が計算値よりも20 ℃高い理由は、溶融樹脂から型に熱が伝わり型表面の温度が上昇したためと考えられる。塗布速度を100、50、10 mm/sと変化させた場合、塗布開始から加圧を開始するまでの経過時間は13 s、14 s、25 sとなり、各時点の樹脂温度は実測値で内挿すると、それぞれ214 ℃、209 ℃、182 ℃となる。各々に応じて、樹脂の粘性と弾性率は変化する。100 mm/sでは、加圧力9 MPaで上下型両面の数十μmの微細凹凸を99 %以上転写し、全面を平滑に転写した。サイクル時間は最速の37.7 sとなった。表3は、サイクルの構成を示す。樹脂のエンタルピーが高いうちに加圧することで、加圧力、加圧時間とも短縮でき、型温は、加熱冷却なしの熱媒供給による145 ℃一定で成形と離型ができた。厚さ0.2 mmの場合の樹脂温度を変化を同様な伝熱計算で算出した結果、図11 (b) に示すとおり、1秒で300 ℃から160 ℃に低下した。これに対しては、今後、別の手段の開発を進める。

(a) 厚さ2mmの場合

(b) 厚さ0.2 mmの場合

図11　PC溶融樹脂をスタンパーに塗布した後の樹脂温度変化

表3　PC樹脂成形品（厚さ2mm）でのサイクル時間の構成

塗布	型閉	加圧転写	型開	離型	サイクル時間(合計)
9.3 s	7.6 s	10.0 s	7.7 s	3.1 s	37.7 s

樹脂温度：300 ℃　　型温(上下とも)：145 ℃(一定)
塗布速度：100 mm/s　　加圧力：9 MPa

3.5 高温での離型

図12は、PC樹脂成形品で、転写時の型温と、成形品を離型するために冷却しなければならない離型時の型温との関連を示す。上型、下型ともに、数十μmの微細凹凸を形成している。転写時の型温が高いほど、離型のためにより低温まで冷却する必要がある。これは、①型温が高いほど、樹脂が型の細部まで充填され、"アンカー効果"による離型抵抗が増すこと、②樹脂と金属との付着力は、接触時の温度に応じて上昇すること、が理由と考える。図に示すとおり、転写時の型温が150 ℃以下となれば、型を冷却しなくても、型開後の放冷でガラス転移温度以下となり、離型が可能となった。

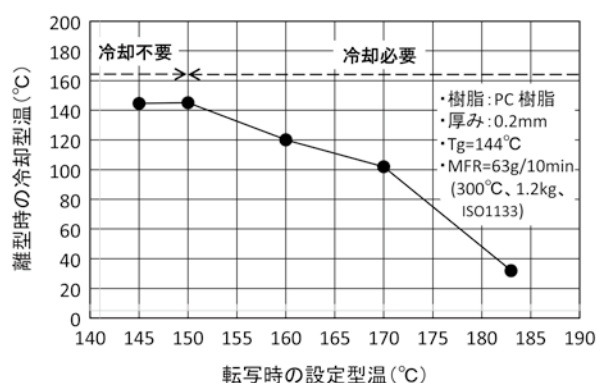



図12 PC樹脂成形品の転写時型温と離型時型温との関連

4. 結　言

本報では、高アスペクト比の微細形状成形、薄肉成形および、多様な樹脂への適用性という溶融微細転写の特長を生かしながら、サイクル時間を短縮する方法を検討した。

(1) 樹脂表面性状の高品質化：高性能ダイで平滑性を向上させることにより、より低温、高速で塗布できるようになった
(2) 厚み分布の高精度化：塗布工程の制御により、μm台の厚み分布を安定して実現し、加圧力や加圧時間を短縮できるようになった
(3) 型と樹脂からの放熱抑制：放熱の抑制により、加熱冷却の時間を短縮できた
(4) 溶融樹脂のエンタルピー、粘性発熱および熱膨張圧の活用：微細形状の転写性と均一性を高めることができた
(5) 離型温度の上昇と型の加熱冷却の省略：転写時の型温を低くすることで、離型温度を高くできた。

結果として、型温は145 ℃一定で、PC樹脂を用いた成形ができるようになった。

今回のサイクル時間短縮は、2 mm厚さでの結果である。今後、100～200 μm厚さでのサイクル時間短縮を達成する。また、高アスペクト比の微細形状転写も同時に実証する。

参　考　文　献

(1) BOOK OF ABSTRACTS, 39th Intern, Conf. on Micro and Nano Eng. (London), MNE2013 (2013)
(2) Hiroshi Ito, Isao Satoh, Takushi Saito and Kazutoshi Yakemoto : Intern. J. of Polym. Proc., XXII (2) (2007), p.155-165
(3) 焼本数利、伊東宏、白銀屋司、内藤章弘、越智昭太、古木賢一、原政樹：" 溶融微細転写装置とその成形実例", プラスチックスエージ, Vol.58, No.706 (2012), p.91-99
(4) Akihiro Naito, Kenichi Furuki, Shota Ochi, Masaki Hara, Hiroshi Ito and Kazutoshi Yakemoto : "A Molding Process with Higher Productivity to Fabricate Nanostructured Surface of High Aspect Ratio by Coating Molten Polymer", 39th Intern. Conf. on Micro and Nano Engineering (London), (2013), p.78
(5) 日本製鋼所技報, No.64 (2013), p.95-98

燃料運搬船ボイルオフガス再液化設備向け 低温ラビリンス圧縮機の船級取得と設計・製造技術の確立

Ship's Classification and Development of BOG Labyrinth Compressor for Liquefied Gas Carrier with Re-liquefaction

技術士 藤後　宏之 *
P.E.Jp Hiroyuki Togo

宮本　寛志 **
Hiroshi Miyamoto

齊藤　泰史 **
Yasufumi Saito

日原　啓太 *
Keita Hihara

平　隼也 **
Toshiya Taira

要　　旨

シェールガスの採掘技術確立に代表されるエネルギー需給構造の変革期に際し、船舶による液化燃料輸送の重要性は益々の高まりをみせている。当社では、ボイルオフガス再液化設備向け低温ラビリンス圧縮機の船級を取得し、LNG ボイルオフガス用途を含めた最低設計温度 -165 ℃までの対応が可能となった。

また、当社製圧縮機の低温用シリンダ部材には、オーステナイト鋳鉄材（FCDA-Ni35）と低温用厚肉球状黒鉛鋳鉄材（FCD300LT）を採用して信頼性と経済性の両立を図った。本報では、船級に係る製造法承認の取得に関して、低温環境での材料試験のほか、実機供試シリンダの非破壊試験と耐圧気密試験による信頼性評価の結果を報告する。また、圧縮機が船体構造に与える荷重振動の予測技術向上のために、実機計測と数値解析を実施して得られた比較結果について報告する。

── Synopsis ──

For the changing energy market caused by shale gas digging technology, the demand for the liquefied gas carrier transportation has become higher. We have obtained the certifications of the low temperature labyrinth compressor for re-liquefaction use from two Classification Society i.e. Class-NK and Lloyd's Register. And we can offer the minimum -165 ℃ designed compressors including LNG boil-off-gas use. We applied the cast irons for low temperature cylinder material, i.e. Austenitic cast iron (FCDA-Ni35) and Heavy-walled ferritic spheroidal graphite cast iron for low temperature service (FCD300LT). These two cast irons ensure the reliability and the economical design of the compressor. On the manufacturing process approval examinations by Classification Societies, the material test at low temperature and the reliability evaluation by nondestructive test, pressure and airtightness test for the cylinder were carried out. And also, in order to estimate the effect of vibration from the compressor to the hull construction, we made numerical vibration analysis and measured the actual vibration on the ground. The analysis result were confirmed closely to the measurement.

* : 広島研究所
Hiroshima Research Laboratory

** : 広島製作所 産機部
Industrial Machinery Dept., Hiroshima Plant

1. 緒　　言

近年、燃料ガスの流通が非常に盛んとなっており、内航・外航船を問わず、液化ガス運搬船の建造数は増加を続けている。この背景として、技術革新によって従来は困難と言われていたシェール層に存在する天然ガスの採掘が可能となったことが挙げられる。さらに、東日本大震災の原発問題による代替エネルギーへの転換需要、米国政府によるシェールガスの対日輸出承認、豪州等の大型LNG製造設備の本格稼動など、各国のエネルギー政策要因が追い風となっている。

低温状態でタンクに貯蔵している液化ガスは、航行中に太陽熱等により気化して、ボイルオフガス（ＢＯＧ）となる。これを再液化するためには、大気圧から一定圧力まで昇圧する必要があり、ＢＯＧ再液化設備用の圧縮機が必要となる。

図１　ラビリンス圧縮機

ＢＯＧ圧縮機は、極低温域から高温域までの幅広いガス温度範囲で運転される。これに対して、ラビリンス圧縮機はシリンダとピストンの間に隙間をもたせたシール構造を有するため、温度変化を伴って長時間運転されるＢＯＧ圧縮機として高い信頼性を有する[(1)]。加えて、縦型圧縮機であるため、舶用で重要視されるフットプリントを小さくできる特徴を有する。

圧縮機稼動中にシリンダとピストンの間の隙間を保持してラビリンスシール性能を維持するために、低温域でも温度による収縮が極めて小さく、かつ低温靭性に優れた特殊材料を選定している。しかし、ラビリンス圧縮機の特殊材料は各船級協会発行の船級規則には定義・規定されていない。そこで、燃料運搬船のＢＯＧ再液化設備用圧縮機にラビリンス圧縮機を適用するためには、特殊材料に対して、材料選定の妥当性を含めた製造法承認を、船級協会から取得する必要があった。

本報では、低温用圧縮機シリンダの信頼性について、船級取得における判断基準の策定経緯と試験結果を報告する。また、舶用圧縮機では、船体構造の剛性設計に影響を与え得る圧縮機の振動特性を把握することも重要であるため、振動予測技術についても報告する。

2. 圧縮機仕様と取得船級

燃料運搬船に使われるＢＯＧ再液化設備用の当社製圧縮機ラインナップと主要仕様は表１の通りであり、市場の要求仕様に広く対応することを可能とした。

表１　舶用圧縮機の主要仕様

圧縮機モデル	J2R140, J2R160, J3R140, J3R160 etc.
吸入温度	-165℃～常温
吐出圧力	～5MPaG
シリンダ材質	（極低温 -165℃）JIS G5510 FCDA-Ni35 （低温-55℃）JIS G5504 FCD300LT
取扱ガス	メタン、アンモニア、エチレン、プロピレン、 エタン、プロパン、塩化ビニルモノマーなど

ここで、シリンダに用いる特殊材料であるFCDA-Ni35とFCD300LTは、いずれも鋼船規則で規定されていない材料であるため、製造法承認の取得に際しては次のような規定を適用した。

まず、各船級規則の源流である国際規則IGCコード（RESOLUTION MSC.370 (93) までの改正含む）においては、設計温度が0 ℃より低く、-165 ℃までのプロセス用管装置のための鋳造品に関する記載は、以下の通りである。The requirements for forgings and castings may be subject to special consideration by the Administration.（Table 6.4 NOTES2/）

これを受けて、鋼船規則N編表N6.4 注2において、「鍛造品および鋳造品に対する要件は、本会の適当と認めるところによる」と記載されている。さらに、検査要領N6.2-4 (2) においては「本表の脚注 (2) に示す鍛造品および鋳造品の規格値は、規則K編に定められているものについて、同編の関連規則に定めるところによる」と記載されている。

一方、鋼船規則K編にはFCD300LTおよびFCDA-Ni35に相当する材料についての規定がない。しかし、K編1.1.1-2に「本編の規定と異なる材料は、設計、施工あるいは用途に関連して、特に承認された場合に使用できる。この場合、製造者は、当該材料の製造方法、性能等に関する資料を提出の上、本会の承認を得なければならない」と規定されている。

そこで、両材料の低温での材料特性の評価試験を船級協会の立会いのもとで実施し、判断基準を協議決定した。結果、日本海事協会およびロイド船級協会より、図２に示す製造法承認を取得するにいたった。

NIPPON KAIJI KYOKAI

APPROVAL OF MANUFACTURING PROCESS

The Japan Steel Works, Ltd., Hiroshima Plant

ClassNK

図２　船級証明書 左：Class-NK, 右：Lloyd's Register

3. 低温用圧縮機シリンダ設計技術

本圧縮機シリンダは、低温環境で繰返し内圧変動を受ける耐圧部品であり、使用期間中にギガサイクルオーダーの変動内圧が負荷される。したがって、初期欠陥からのき裂進展を許容しないことはもちろんのこと、想定外のき裂進展時においても不安定破壊を生じずに安定的にき裂が成長すること、すなわちLBB（Leak Before Break）を保証することがリスク低減のために重要である。

そのため、破壊力学的な設計指標の閾値設定は、信頼性を確保するうえで極めて重要である。しかし、き裂進展の有無に関与する下限界応力拡大係数範囲（ΔK_{th}）や、不安定破壊の有無に関与する破壊靭性値（K_{IC}）に代表される閾値は、多数の因子に影響を受けて変化する。具体的には、使用温度、基地組織、応力拡大係数の増加速度、応力比、引張強度、降伏応力、鋳込寸法、結晶粒径などの因子が複雑に関与する。特に、FCD300LT材は比較的廉価な一方で、基地組織がへき開面を有するフェライト系鋳鉄である。したがって、当社では、これらの材料特性と圧縮機の使用条件を熟慮して、保守的かつ経済的な数値を閾値として設定した。

低温用シリンダのき裂進展挙動の評価は、図3に例示する構造解析をもとに行なった。具体的には、解析によって得られた応力集中部位にき裂モデルを置き、き裂面垂直応力から応力拡大係数を算出して評価した。なお、き裂モデルの形状と寸法には、き裂進展の有無を評価するために最大許容寸法の初期欠陥としてアスペクト比1の半円形状と、不安定破壊の有無を評価するためにアスペクト比3で深さが肉厚の80%の半楕円形状の二種類を用いた。

これらの評価指標と構造解析をもとに、信頼性の高い低温用圧縮機シリンダを実現した。

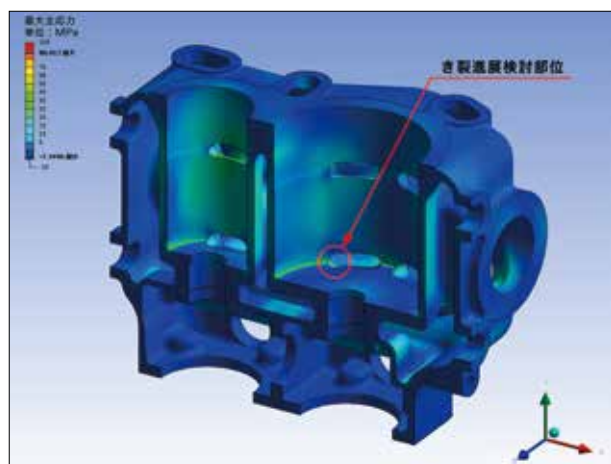



図3　FCD300LT材シリンダの構造解析

4. 低温用圧縮機シリンダ材料特性

シリンダに用いる鋳鉄材は、低温環境で耐圧部材としての長期信頼性を確保する必要がある。当社では、低温環境での材料信頼性を確保するために、化学成分調整、添加元素の二次接種による黒鉛微細化、熱処理条件など製造最適化を図った。また、破壊靭性値に代表される材料健全性に関しては、シャルピー衝撃試験による間接評価手法を確立して評価効率を高めた。以下に、シリンダ材料の信頼性評価結果を述べる。

4.1 低温靭性

シリンダに用いる鋳鉄材の低温靭性を保証するために、各種材料試験を実施した。一例として、低温シャルピー衝撃試験の結果を以下に示す。なお、試験には全て2mm Vノッチ試験片を用いた。

まず、最低設計温度が-165 ℃のシリンダに用いるFCDA-Ni35材について述べる。図4に常温から-196 ℃までの衝撃値と脆性破面率をあわせて示し、図5に常温と-196 ℃で試験した破面のSEM観察像を示す。まず、衝撃値に関しては、低温側でも急激な低下が無く、遷移現象は確認されない。なお、本材料の基準衝撃値に関しては、JIS規格に規定が無いため、Ductile Iron Societyの鋳鉄材データベースに記載の参考値14.9Jを当社基準値として準用している。当社製FCDA-Ni35材は、試験温度-196 ℃でも衝撃値20J以上を有しており、極めて良好な低温性能を実現した。次に、脆性破面率に関しては、試験温度-196 ℃でもへき開面が観察されず、全面で延性的破壊の様相を呈している。さらに、基地組織がオーステナイト単相で構成されていることも別途確認しており、低温環境でも脆性不安定破壊を生じない信頼性の高い材料であると言える。

次に、最低設計温度が-55 ℃のシリンダに用いるFCD300LT材について述べる。図6に常温から-60 ℃までの衝撃値と脆性破面率をあわせて示し、図7に常温と-60 ℃で試験した破面のSEM観察像を示す。なお、最低試験温度は、鋼船規則の規定に従い、設計温度より5 ℃低い-60 ℃を採用して信頼性の向上を図っている。まず、衝撃値に関しては、JIS基準値6J（-40 ℃, 2mm Uノッチ）に対して、15J（-60 ℃, 2mm Vノッチ）を有しており、優れた低温靭性を確認した。さらに当社では、FCD300LT材について破壊靱性値が上部棚域であることを保証するために、脆性破面率に対しても独自の判定基準を規定した。本圧縮機の運転条件では脆性破面率50%以下が規定値である。これに対して、最低試験温度-60 ℃で20%を実現しており、脆性不安定破壊に対して高い信頼性を有する材料であると言える。

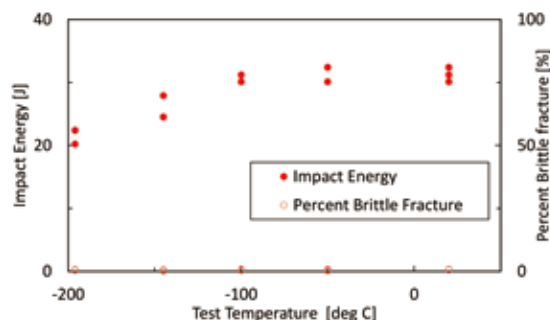



図 4　FCDA-Ni35 材のシャルピー衝撃試験結果

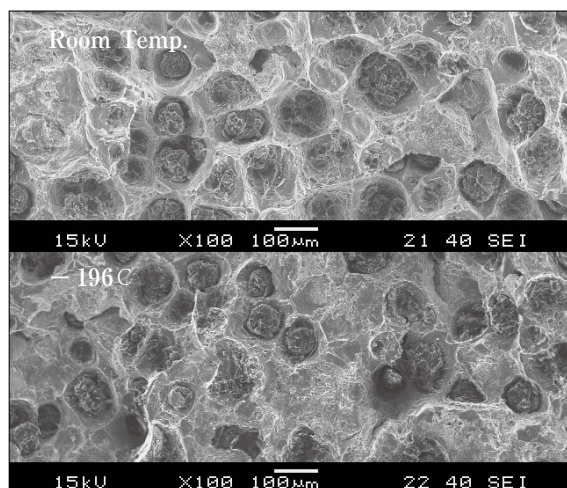



図 5　FCDA-Ni35 材の破面 SEM 観察像

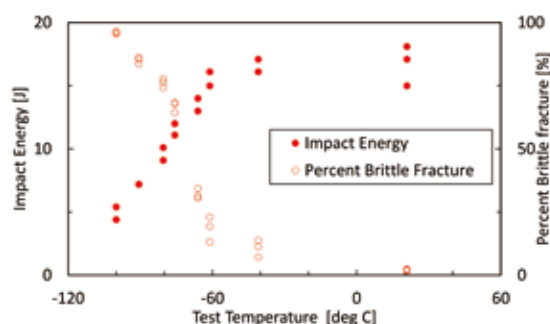



図 6　FCD300LT 材のシャルピー衝撃試験結果

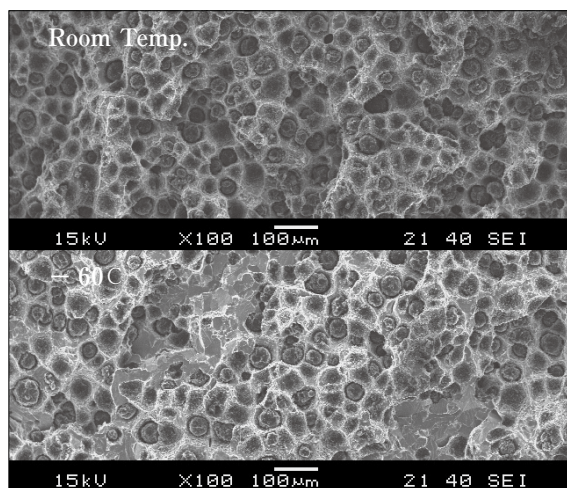



図 7　FCD300LT 材の破面 SEM 観察像

4.2　低温強度

圧縮機の通常運転時にはシリンダが低温環境にさらされるため、低温強度を保証することは信頼性確保のうえで重要である。一例として、図 8 に当社製 FCD300LT 材の常温から -60 ℃の温度範囲での引張強さと 0.2% 耐力を示す。一般的に金属材料は、組織が健全であれば低温になるほど材料強度は向上する。当社製 FCD300LT についても、低温側で材料強度が滑らかに向上しており、低温環境での強度信頼性を確認した。

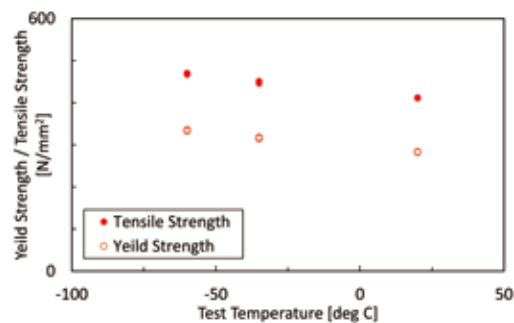



図 8　FCD300LT 材の低温引張試験結果

4.3　高温強度

低温用圧縮機の低圧段・低温用シリンダは、極低温のＢＯＧを吸込むため、連続運転時には吐出温度が常温より低い。しかし、圧縮機の運転開始時には、吸込温度が常温付近であるため、吐出温度が高温になる。FCDA-Ni35 材は基地組織がオーステナイト相の鋳鉄であるが、一般的にオーステナイト系の鋼材では他の鋼材より高温での強度が低下しやすいという特性がある。したがって、高温強度を把握しておくことも設計上重要である。図 9 に当社製 FCDA-Ni35 材の常温から 200 ℃の温度範囲での引張強さと 0.2% 耐力を示す。高温環境での材料強度低下分を考慮して強度設計を実施することで、予冷運転を必要としない常温からの圧縮機運転の強度信頼性を確保した。

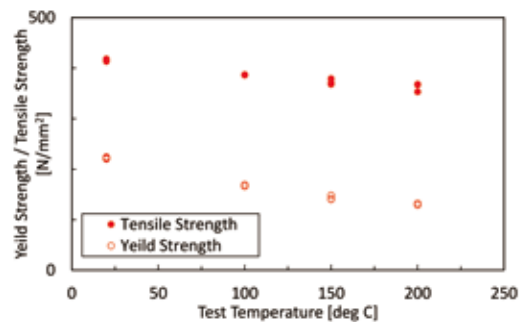



図 9　FCDA-Ni35 材の高温引張試験結果

5. 実機シリンダの健全性評価

5.1 製造法の信頼性評価

鋳鉄品の初期欠陥有無は、製造法に大きく影響を受ける。そこで、当社における鋳鉄製シリンダ製造法の信頼性を実証するために、実機シリンダを製作して非破壊試験を行なった。図 10 に、FCDA-Ni35 材シリンダの染色浸透試験状況を一例として示す。なお、磁性を有する FCD300LT 材シリンダは、磁粉探傷試験で評価した。結果、いずれも設計許容寸法を超える欠陥は確認されず、製造法の信頼性を確認した。

図 10 染色浸透探傷試験（FCDA-Ni35 材シリンダ）

5.2 静的強度と気密性評価

静的強度と気密性を実証するため、試験用実機シリンダの耐圧気密試験を行なった。図 11 に FCDA-Ni35 材シリンダの耐圧気密試験状況を一例として示す。耐圧試験では、加圧水を用いてシリンダ設計圧力の 1.5 倍以上の圧力を印加した状態を 30 分間以上保持し、除圧後に変形が残らないことを確認した。また、気密試験では、空気によってシリンダ設計圧力以上の圧力を印加した状態を 10 分間以上保持したのち、加圧空気の漏洩が無いことを確認した。

図 11 耐圧気密試験（FCDA-Ni35 材シリンダ）

6. 振動予測技術

圧縮機を船舶に搭載する上では、船体構造の剛性設計に影響を与え得る圧縮機の振動特性を把握する必要がある。そこで、機構解析ソフトウェア Adams を用いた数値解析による振動予測を実施した。一般的な構造解析とは異なり、圧縮機の運転状態を考慮した、動的な荷重状態を把握できる点が大きな強みである。以下に、船用圧縮機を対象として、実機試験と数値解析を比較評価した結果を示す。

6.1 実機の振動計測

まず、実機を用いた振動試験の状況を図 12 に示す。試験対象とした機種は 2 連圧縮機（J2R160）であり、船舶に搭載する BOG 再液化設備用圧縮機として当社がラインナップしている主要機種のひとつである。試験では、圧縮機から架台に作用する垂直下向荷重を計測するため、圧縮機と架台の締結部にロードセルを設置した。また、シリンダ内部に圧力を負荷するため、吐出配管と試験用リザーバタンクをシリンダに接続した。

一例として、回転速度 600rpm の定速運転で計測された垂直下向荷重を図 13 中に実線で示す。ただし、図 13 に示す荷重値は、試験で得られた最大荷重値に対する比率で示す。

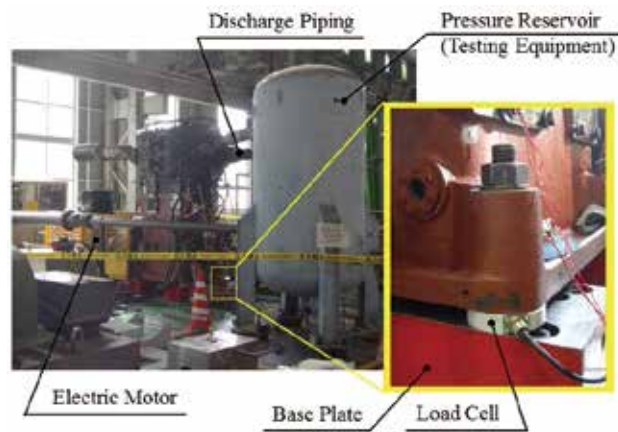



図 12 実機振動試験

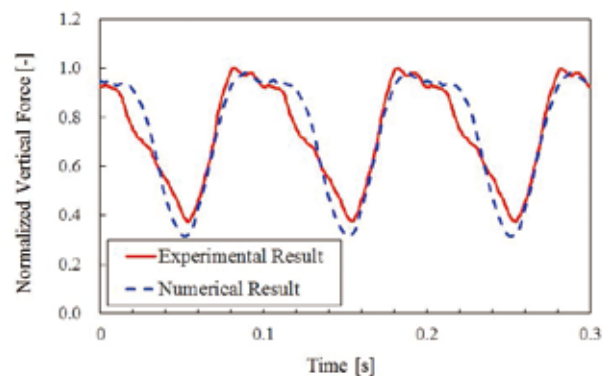



図 13 架台に作用する垂直下向荷重

6.2 数値解析による振動予測

次に、実機試験を行なった2連圧縮機（J2R160）の振動解析について述べる。解析モデルを図14に示す。振動解析では、圧縮機の弾性変形を考慮することで、より現実に近い振動予測を可能とした。一例として、シリンダ内圧による部品変形を考慮することで、各部の変位による慣性力を反映した予測を可能とした。

さらに、図15に示すような、実機試験を模擬した解析モデルを構築した。本解析では、以下の三点を考慮して解析条件を設定した。第一は、ロードセルの剛性である。試験に用いたロードセルは圧縮機部品と比較して剛性が低いことから、振動状態に影響すると考えた。そこで、圧縮機モデルと架台モデルの締結部に、ロードセルの剛性を表現したバネ要素を設けた。第二は、吐出配管と試験用リザーバタンクの剛性である。シリンダに接続された配管は、圧縮機振動を抑える働きがある。そこで、吐出配管と試験用リザーバタンクをモデル化するとともに、変形を考慮できる弾性体モデルとした。第三は、シリンダ内部に作用するガス圧力である。シリンダ内圧の変化に対する振動状態の変化を詳細にとらえるため、実機試験で得られた圧力波形から算出した荷重をピストンとシリンダに負荷した。

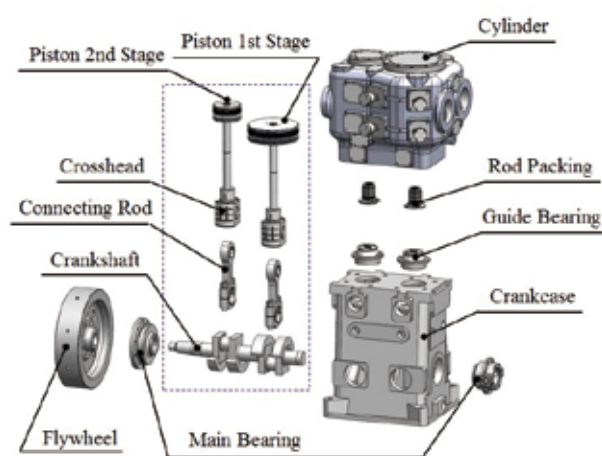



図14　2連圧縮機（J2R160）の振動解析モデル

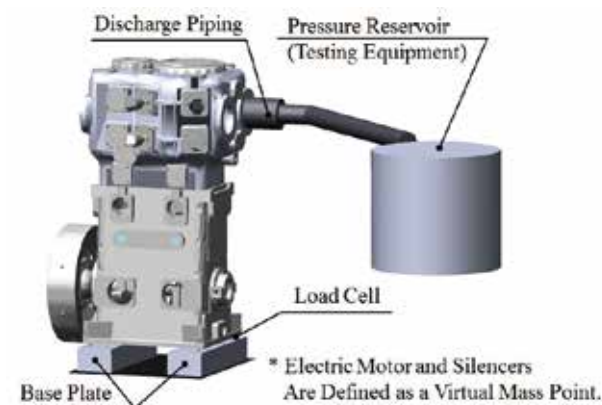



図15　実機試験を模擬した振動解析モデル

振動解析で得られた垂直下向荷重を図13中に破線で示す。試験結果と解析結果を比較すると、両波形は良い一致を示した。この結果より、2連圧縮機（J2R160）の解析妥当性だけではなく、他機種の振動特性も精度良く予測できる可能性が示された。今後、船体の揺動条件を考慮した解析を行うことで、より信頼性の高い振動予測技術に展開できるものと考える。

7. 結　言

本報では、液化燃料運搬船に搭載されるボイルオフガス再液化設備に適している低温ラビリンス圧縮機について当社の取り組みを報告した。以下に概要をまとめる。

(1) 日本海事協会とロイド船級協会から、船級に係る製造法承認（工場承認）を取得した。
(2) 船級規則に規定されていないシリンダ材の設計手法と材料評価方法について船級協会と協議のうえ、材料試験と実機供試シリンダによる評価を行った。
(3) 圧縮機が船体構造に与える荷重振動について、実機試験と数値解析の比較評価を行い、良い一致を得た。

今回取得した製造法承認と既に取得している設計承認とを合わせて、LNGやLPGを含む多くの液化燃料ボイルオフガス用途として、最低設計温度 -165 ℃までの船級対応が可能となった。また、他協会の船級取得が必要となった場合にも、今回の実績から円滑な取得対応が可能と考える。

今後、世界的なエネルギー輸送のなかで、ますます重要性が高まる液化燃料輸送に対して、当社製のラビリンス圧縮機が貢献できるよう、製造技術と設計解析技術を積極的に向上していく所存である。

参　考　文　献

(1) 立山 省吾，宮本 寛志，児嶋 伸士，平 隼也 ：日本製鋼所技報，No.65 (2014)，p.102-107

マドックスクリュにおける可視化観察と混練性評価

Visual Analysis of the Maddock Screw and Evaluation of its Mixing Performance

千葉　英貴
Hideki Chiba

安江　昭
Akira Yasue

荒木　克之
Katsuyuki Araki

要　　旨

本研究では射出成形機や押出機で使用されるマドックスクリュを対象に、実験で観察された流動パターンおよび滞留時間と流動解析結果との比較検討を行い、混練特性の評価手法を検証した。マドックスクリュにおける流動パターンは、全周が透明なアクリル製の可視化シリンダ装置を用いて、溶融樹脂を模擬したシリコーンオイルにトレーサを添加して流跡観察から明らかにした。本装置は、シリンダを回転させることができるため、マドックスクリュを静止させた状態で流動パターンの観察が可能となっている。その結果、本装置によりマドックスクリュ内の複雑な流動パターンを視覚的に捉えられ、さらに、それは流動解析においても非常によい一致を示し、混練特性の評価手法としての有効性が確認できた。

── Synopsis ──

In this work, we verified evaluation methods of the mixing performance of the Maddock screw based on the comparison between experiments and analyses concerning the flow pattern and the residence time. The flow behavior around the Maddock screw was analyzed visually inside the transparent acrylic cylinder by tracking tracer particles in the silicon oil. As the cylinder is rotating and the mixing elements is not rotating, the flow around the mixing elements can be observed easily. As a result, the flow behavior was found visually using the visual cylinder, and furthermore, this flow behavior was close to flow analysis results. It was proved this evaluation methods of the mixing performance is useful.

1. 緒　　言

射出成形機、および押出機のスクリュにおいて、マスターバッチや顔料等の分配性・分散性を向上させるためにはスクリュ先端部に、マドックスクリュやダルメージスクリュなどの混練スクリュを配置することが一般的である。

本研究は、可視化装置を用いて混練スクリュ上の樹脂の流れを観察することで、設計通りの樹脂流れが確保できているかを確認し、さらに流動解析を実施し、可視化観察では得られない物性の予測を行うことで、実験と解析の両面から混練特性の評価手法を確立することを目的としている。実験では2種類の異なる流路のマドックスクリュに対して、可視化シリンダ内にトレーサを投入し、そのトレーサの流れ方の違いを観察した。トレーサの観察結果からマドックスクリュ上を流れるトレーサの流跡線を1枚の写真として得ることで、それぞれのスクリュにおける特徴的な流れを確認した。また、流動解析では、マドックスクリュ内における流体の滞留時間、総せん断ひずみ、圧力分布を指標に各スクリュの特徴について考察し、本評価方法の検証を行ったので報告する。

広島研究所
Hiroshima Research Laboratory

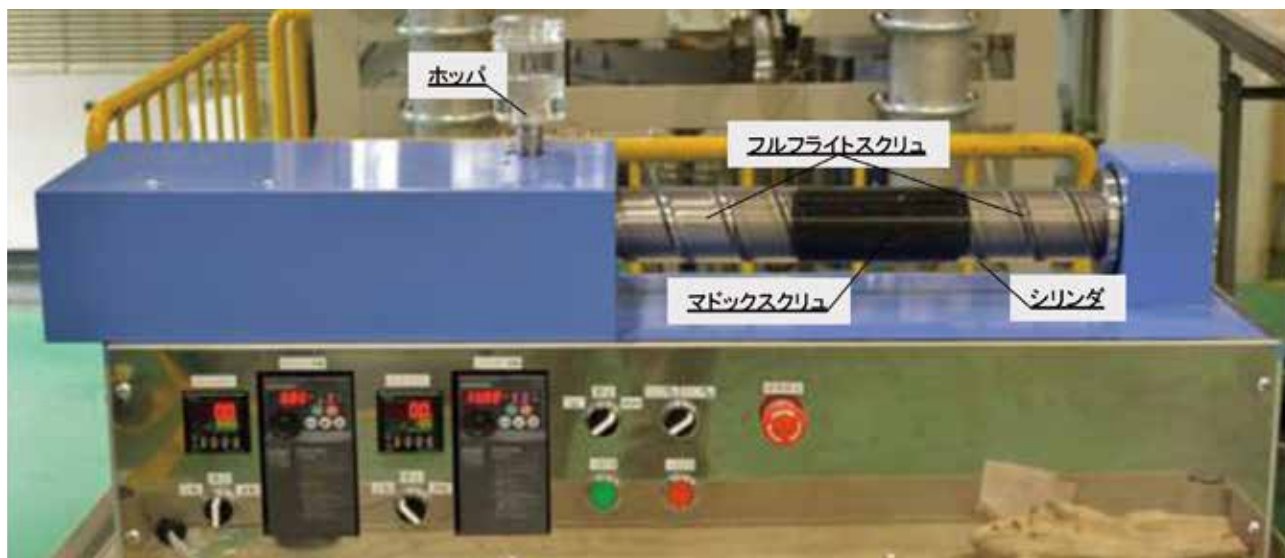



図１　シリンダが回転可能な可視化装置

2.　実験装置

図１に実験に用いた可視化装置を示す。観察に用いた可視化装置は、シリンダが透明なアクリルでできており、シリンダと混練スクリュをそれぞれ単独で、もしくは、両方同時に回転させることができる。そのため、図２に示すように、混練スクリュを静止させた状態でシリンダを回転させることで、スクリュ内の樹脂の流動状態を定点観察できる点が特徴である。以下に装置の仕様を示す。

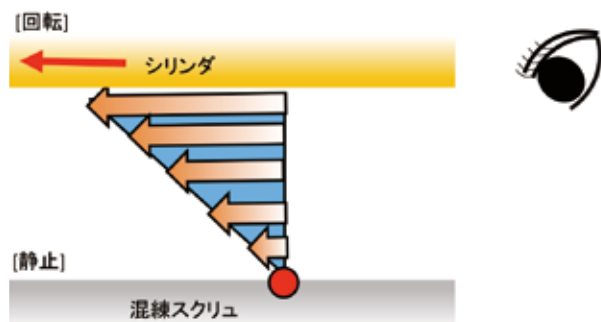



図２　シリンダ回転による可視化の模式図

シリンダ	：アクリル製透明シリンダ
スクリュ径	：φ 50 mm
スクリュ長	：L/D ＝ 11
流体	：シリコーンオイル
シリンダ回転速度	：max 300 rpm

装置内の流体は、ホッパから投入され、スクリュによって輸送される。スクリュ先端に到達した流体は、装置下部に設けたスクリュ先端と基部を繋いだ配管を通って循環するよう設計されている。

今回、観察した混練スクリュはマドックスクリュである。一般的な形状を図３に示す。スクリュ軸方向に軸と並行な溝形状を持ち、周方向の溝間にはバリアフライトと呼ばれる流体の流路が設けられている。軸方向に設けられた溝は軸方向先端に向かって閉じているため、流体はこのバリアフライトを通過して溝から溝へと流れていく。

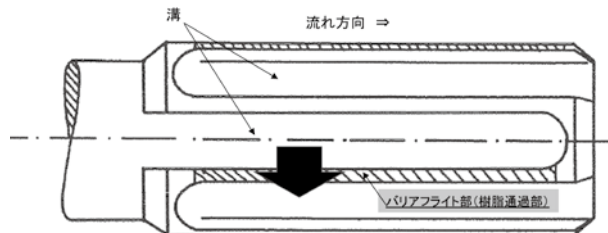



図３　マドックスクリュ

したがってマドックスクリュでは、流体がバリアフライトを通過する際にせん断を加え、均一に分散を促進する効果がある(1)。マドックスクリュでは、溝を周方向に設ける条数や、軸方向に設ける溝の段数、バリアフライト部のクリアランス、また、スクリュ自体に輸送能力を持たせる場合は、溝の軸方向に対する角度、等が設計のポイントとなっており、様々な形状のものが提案されている。

今回の実験には、図４に示す流路が異なる２種類の形状のマドックスクリュを用いた。まず、図４上のマドックスクリュは、周方向に 16 条、軸方向に４段の溝から構成されている。流体の流れは、スクリュ内を図中矢印のように通過するよう設計している。図５にスクリュの回転と回転によって発生するせん断流れの模式図を示す。バリアフライトはすべてせん断流れ方向に設けており、流体はスクリュ内を階段状に通過していく。次に、図４下のマドックスクリュは、

溝形状、条数、段数は図４上のものと同様であるが、バリアフライトの位置が異なっており、２段目のバリアフライトをせん断流れとは逆側に設けてある。そのため、流れ方向としては図４下に示す矢印のようになる。以下、図４上のマドックスクリュを順流路タイプ、下側を逆流路タイプと呼ぶこととする。

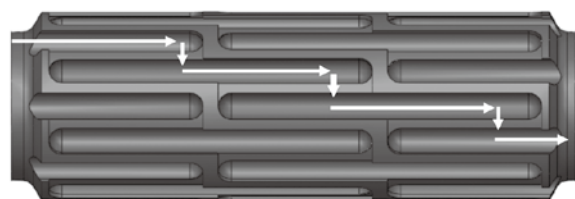
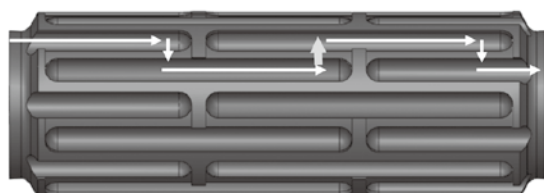



図４　実験に使用した２種類のマドックスクリュ

図５　スクリュ回転とせん断流れの模式図

3.　実験方法

可視化装置を用いて上述した２種類のマドックスクリュに対して樹脂トレーサ（ポリカーボネイト製 ϕ 0.5mm）入りのシリコーンオイルを流した。シリンダ回転速度は 37・50・62rpm の３水準で観察を行った。シリンダを回転させることによりマドックスクリュを静止させた状態で、樹脂トレーサの動きをビデオカメラで撮影した。今回使用したマドックスクリュは溝が軸と平行に設けられているため、輸送能力を持たない。そこで、シリコーンオイルが装置内を循環するよう、図１のようにマドックスクリュの前後にフルフライトスクリュを配置し、輸送能力を持たせている。

観察結果の処理方法については、トレーサの動きが一枚の写真として観察できるよう流跡線を作成した。手順を以下に示す。

流跡線作成手順

◎撮影動画を任意の時間間隔における連続画像に変換する

◎変換した画像から一つのトレーサに着目し、一定時間間隔ごとに、トレーサの画像のみを切り取る

◎マドックスクリュの画像を背景に、切り取ったトレーサの画像を貼り付ける

本手法を用いて、各条件、各トレーサにおける流跡線を作成した。

4.　実験結果

まず、順流路タイプについて流跡線を作成した結果を図６に示す。50 個のトレーサを観察した結果、概ね、三つの流跡パターンに分類された。それぞれの流跡は三つのバリアフライトを乗り越える位置が限定されていることが分かり、図６上は、すべてバリアフライトの中央付近を乗り越え、図６中は、三つのバリアフライトを手前 → 奥 → 手前の順で乗り越え、図６下ではバリアフライトを奥 → 手前 → 奥の順で乗り越えていることが分かった。

次に、逆流路タイプの流跡線を作成した結果を図７に示す。逆流路タイプについても順流路タイプと同様に三つの流跡パターンが得られた。逆流路タイプでは２段目のバリアフライトがせん断流れとは逆方向の関係にあるが、トレーサはせん断流れとは逆方向のバリアフライトを乗り越えてマドックスクリュ上を通過していることが観察された。

次に、それぞれのマドックスクリュ、条件における平均滞留時間を測定した結果を表１に示す。動画撮影中にマドックスクリュ上を通過した 50 個のトレーサの平均滞留時間を測定した。結果から、シリンダ回転速度の上昇に

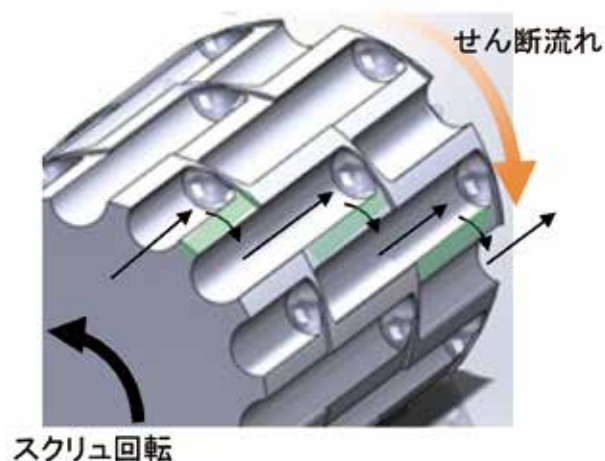



図６　順流路タイプの流跡パターン

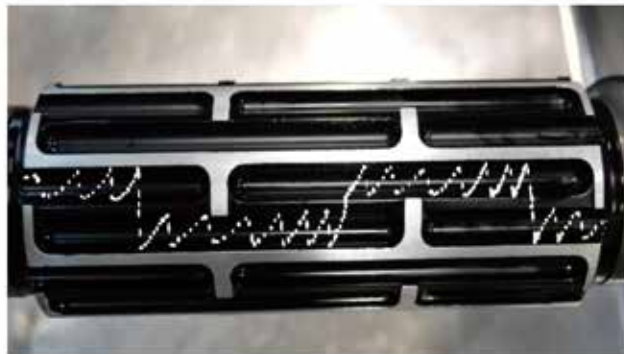



図７　逆流路タイプの流跡パターン

応じて滞留時間は短くなることが分かる。また、流路のタイプ別に比較すると、１秒以内の差ではあるが、全ての回転条件において、滞留時間は、逆流路タイプの方が大きいことが分かる。

表１　条件別平均滞留時間

回転速度 [rpm]	平均滞留時間 [s]	
	順流路	逆流路
37	16.2	17.0
50	12.7	13.4
62	9.7	10.0

次に、それぞれのマドックスクリュ、条件における滞留時間のヒストグラムを図８に示す。ヒストグラムの形状から特徴的な傾向は見られないが、逆流路タイプの方が、一部、滞留時間の大きいトレーサが存在していることが分かる。よって、この滞留時間の長いトレーサが逆流路タイプにおける平均滞留時間を大きくしている原因であることが推測された。

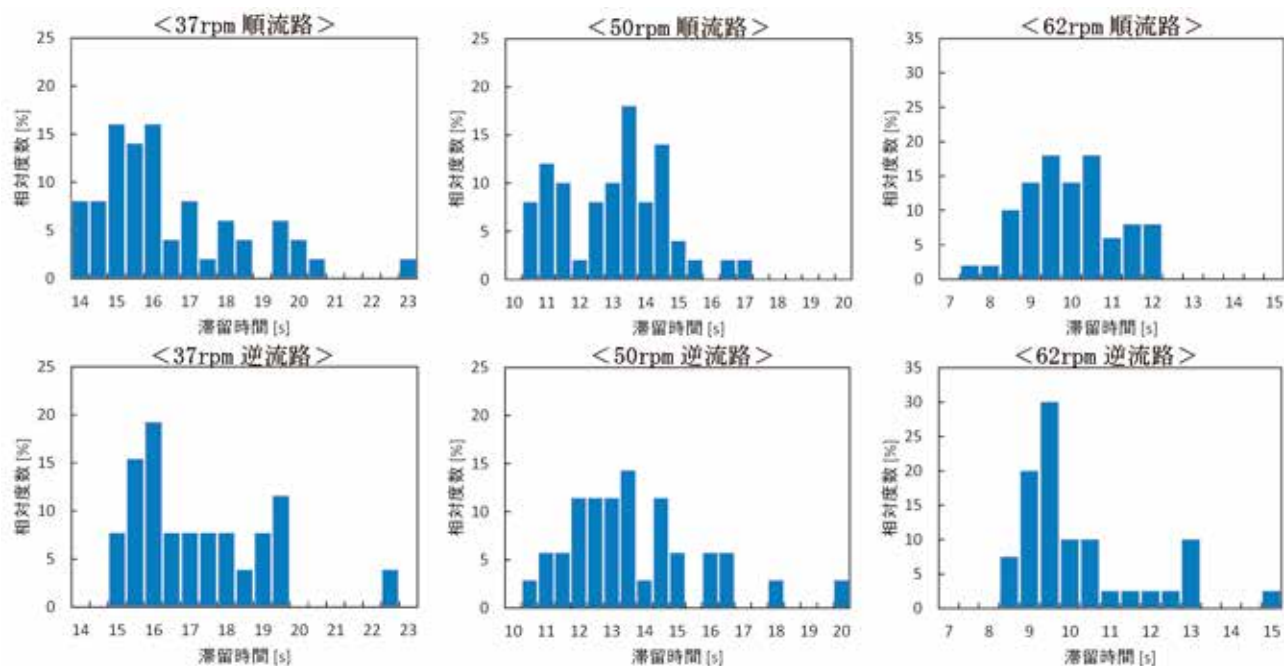



図 8　各条件における滞留時間のヒストグラム

5. 考　　察

5.1　流跡パターンについて

前章において、図 6、7 の流跡線の観察から、順流路および逆流路タイプにおいてそれぞれ特徴的な流跡パターンが存在することを示した。本現象について考察を行うために、図 9 に溝断面におけるトレーサの動きを模式的に示す。溝内では図 9 左の溝に示すようにシリンダの回転によって、せん断流れが発生し、その流れによってトレーサが回転運動を行っている。トレーサの動きは図 9 右の溝に示すように層状に回転しながら軸方向に移動していることが観察された。また、一つのトレーサは溝内で回転層間を移動しながら進んでいることが分かった。そして、バリアフライトを乗り越える際はトレーサが外周を回転している時であることが観察された。また、それぞれの流跡パターンにおいて最初にマドックスクリュの溝に進入する際の溝深さ位置が異なることが観察され、進入する溝深さ位置によって流跡パターンが決定されていることが推測された。

この流跡パターンは順流路タイプ、逆流路タイプともに見られ、逆流路タイプの逆流路部においては、せん断流れとは逆向きにバリアフライトを乗り越える様子が観察された。つまり、せん断流れより優勢な圧力流れによってバリアフライトを乗り越えていることが推測される。

5.2　流動解析を用いた混練性評価

可視化観察結果より、滞留時間は順流路タイプよりも、逆流路タイプの方が長い傾向にあることが分かった。また、5.1 項の考察から、逆流路タイプにおけるバリアフライトの

図 9　溝断面のトレーサの流れ

乗り越え挙動はせん断流れによるものではなく、圧力流れが優勢となって通過していると考えられるため、逆流路バリアフライト部において圧力損失が大きくなっていることが推定される。これらの実験結果から、それぞれのスクリュにおける混練性は異なると考えられた。そこで、流動解析ソフトを使用して、混練性の評価を実施した。

混練性の一つの評価指標として、流体が系の入口から出口までに受ける総せん断ひずみが挙げられる(2) (3)。そこで、それぞれの総せん断ひずみを算出し、混練性の比較を行った。流動解析には、汎用熱流動解析ソフト SCREWFLOW-MULTI を使用し、定常解析ならびに粒子追跡法による解析を行った。粒子追跡法による解析では、モデルの流入口に配置した体積、質量を持たない粒子が流出口に到達するまでの滞留時間や通過した位置におけるせん断速度の履歴などを評価することができる。順流路タイプの解析モデルを図 10 に示す。逆流路タイプにおいても同様のモデルで解析を実施し、出力結果の比較を行った。

図10　解析モデル（順流路タイプ）

まず、解析において流体の流れを再現できているかを確認するため、順流路タイプについて粒子追跡法による解析を行った結果を図11に示す。解析結果においても可視化観察同様に、バリアフライトを乗り越える位置が限定された流跡パターンが得られていることが分かり、実現象を表現できていることが確認された。また、図11には実験で観察された3パターンの流跡線のみを抽出し、示しているが、解析結果ではバリアフライト部の全面で粒子が乗り越えている様子が確認できた。可視化実験において三つの流跡パターンに分類された要因は、トレーサの直径とバリアフライトのクリアランスの関係から、トレーサがバリアフライトを乗り越える位置が限定されたためであると推測される。

次に、それぞれのモデルにおける流体の滞留時間分布を図12に示す。結果は、解析領域に配置した1600個の粒子が解析領域出口に到達するまでの滞留時間の分布を表している。結果より、実験結果同様に、逆流路タイプの方が、順流路タイプよりも滞留時間の長い粒子が多いことが確認され、順流路タイプの平均滞留時間は10.7 s、逆流路タイプでは14.8 sとなった。

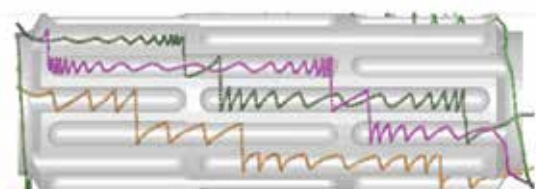



図11　粒子追跡法による解析結果（順流路タイプ）

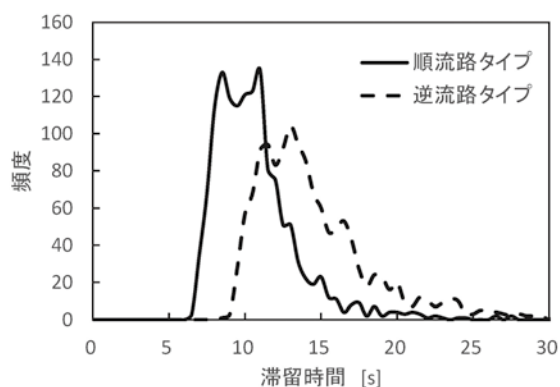



図12　滞留時間分布解析結果

次に、それぞれのマドックスクリュにおける総せん断ひずみを比較した。せん断ひずみは式 (1) で表される。

$$\gamma = \sum_{t_{in}}^{t_{out}} \left(\dot{\gamma} \cdot t \right) \quad \cdots\cdots (1)$$

t_{in}　：粒子がマドックスクリュに流入した時間
t_{out}　：粒子がマドックスクリュから流出した時間
γ　：せん断ひずみ
$\dot{\gamma}$　：せん断速度　[1/s]
t　：単位時間　[s]

解析結果を図13に示す。グラフは、粒子追跡法による解析によって得られた解析領域内の粒子が受けるせん断ひずみの総量を示している。結果より、逆流路タイプの方が順流路タイプよりも粒子に与えるせん断ひずみが大きいことが予測された。この要因として、式 (1) と図12からそれぞれのマドックスクリュにおける滞留時間の差異が影響していると考えられる。

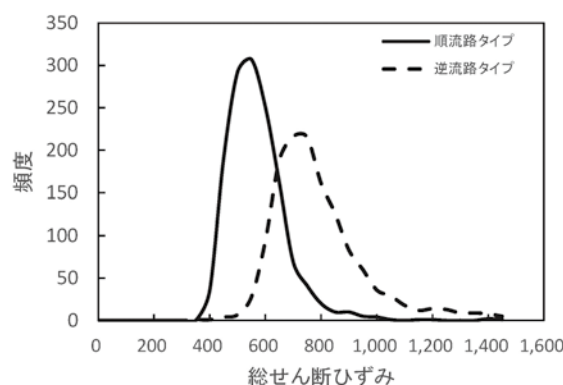



図13　総せん断ひずみ分布解析結果

以上より、総せん断ひずみを指標とした混練性の評価では、逆流路タイプの方が、混練性が高いことが示された。

5.3　形状別の圧力損失の比較

次に、解析領域内における圧力損失を出力した結果について図14に示す。解析では圧力場を発達させるため、実験で用いたオイルの粘度の100倍を設定している。グラフは各流路断面における平均圧力分布を表しており、両タイプの結果を比較すると、逆流路タイプの方が、順流路タイプよりも圧力損失が大きいことが分かる。また、その差は逆流路部において発生していることが確認できる。よって、滞留時間の差と圧力損失による温度上昇を考慮すると[4]、混練スクリュを通過する樹脂の温度上昇は逆流路タイプの方が大きくなることが推定される。

図 14　軸方向における平均圧力分布解析結果

解析で予測された結果を表 2 にまとめると、それぞれのマドックスクリュにおいて一長一短があることが分かり、それぞれの混練スクリュを定性的に比較すると、順流路タイプでは温度上昇が小さいかわりに混練性は低く、反対に逆流路タイプでは混練性が高いかわりに温度上昇が大きくなることが示唆された。よって、混練スクリュを選定する際には、これらの特徴を踏まえた上で、使用する樹脂物性や混練性の要求度を考慮することが重要となる。

表 2　タイプ別解析結果まとめ

	順流路タイプ	逆流路タイプ
滞留時間	短	長
温度上昇（圧力損失）	小	大
混練性（総せん断ひずみ）	低	高

6. 結　言

シリンダが回転可能な可視化装置を用いることで混練スクリュ内の複雑な流路形状における流体の流れを視覚的に捉えることに成功した。流路が異なる 2 種類のマドックスクリュの観察結果から、流体の流跡パターンは同様であるが、滞留時間が異なることが推定され、流動解析の結果、混練スクリュ内を流れる流体の温度上昇や混練度合いが異なることが示唆された。本研究により、可視化実験と流動解析の両面から混練スクリュの評価が可能となった。今後は、混練スクリュ内における温度上昇の評価や成形品の分散性評価を行なうことで、精度よく混練スクリュの性能を予測できることを目指し、弊社スクリュシリンダ設計技術の向上を図っていく所存である。

参 考 文 献

(1) C.Rauwendaal:PolymerExtrusion,p.416, HANSER PUBLISHERS (1986)

(2) W. D. Mohr, R. L. Saxton and C. H. Jepson : Ind. Eng. Chem., Vol.49, No.11 (1957), p.1855-1856

(3) (社)プラスチック成形加工学会 : 成形加工における移動現象, p.222-228, 森北出版 (2011)

(4) 大柳 : ポリマープロセッシング・レオロジー入門, p.152-157, アグネ承風社 (1996)

二軸押出機内での樹脂混練挙動の可視化観察
― 嵩密度から考察する可塑化現象 ―

Visualization Experiment for Kneading Behavior of Polymer in Twin Screw Extruder
― Effect of Bulk Density on Plasticizing Phenomenon ―

竹内　貴季＊
Takahide Takeuchi

重石　高志＊
Takashi Shigeishi

博士（工学）　富山　秀樹＊
Dr. Hideki Tomiyama

要　　旨

二軸押出機内での樹脂原料の可塑化挙動を観察することを目的とし、可視化シリンダを用いた実験を行った。同時に内部圧力と内部樹脂温度の測定を行い、これらの結果から二軸押出機内部の可塑化部周辺における樹脂原料の嵩（かさ）密度変化を推算した。推算値と可視化観察結果から、二軸押出機内での可塑化挙動を考察した。その結果、二軸押出機内では、嵩密度がしきい値を超えることで可塑化が開始されることが示唆された。

―― Synopsis ――

In order to observe the plasticizing behavior of the polymer resin in the twin screw extruder, experiments were performed using the visualization barrel. Further, the bulk density of the polymer around the plasticization zone in the extruder was estimated by measured pressure and temperature of the polymer resin. We considered the plasticizing behavior based on the estimated bulk density and the visualization analysis. As the results, it was suggested that the plasticizing was initiated when the bulk density exceed the threshold value.

1. 緒　　言

二軸押出機はコンパウンド分野で多く用いられており、そこでは二軸押出機の特徴ともいえる高い混練性能が活かされるプロセスが多く、多種複合材や高能力押出への適用事例が年々増加している。ただ、これらコンパウンディングでは、原料がペレットの場合は押出機内部の樹脂挙動が安定するが、パウダーになると溶融可塑化不良やフィードネック（供給部への原料の食い込み不良）が生じることがある。このため、パウダー原料では供給部を長くし、可塑化混練部も長くしたスクリュ構成が経験的に採用されるが、この現象に対して詳細な理論的裏付けが不十分な点も多く、プロセス最適化の難易度が高くなる場合もある。

パウダーとペレットにおける大きな差異はその粒子径であるが、パウダーの場合は質量が低いためその集合体の嵩（かさ）では空気相を多く含むことにより、その嵩密度はペレットよりも大幅に低下する。押出機内で樹脂が溶融可塑化するためには、この嵩を圧縮して密度を上昇させた上で、せん断および伝熱エネルギーを付与しなければ、高い効率と安定性を確保できないと言われている。

本研究では、耐圧ガラスを用いた可視化シリンダ[1,2]を二軸押出機に装着し、パウダーとペレットの溶融可塑化挙動の違いを観察すると同時に、その現象の理論的考察を試みた。溶融可塑化前に樹脂原料に圧縮が加えられる過程で嵩密度のしきい値を越えることで可塑化が開始することを見いだし、またこのしきい値はパウダーやペレットの粒子径によらず樹脂原料によって定めることが可能なことが示されたので、今回はこれら内容について報告する。

＊：広島研究所
Hiroshima Research Laboratory

2.　嵩密度推算のための予備実験

二軸押出機内で効率良く溶融可塑化が行われるためには、スクリュ回転によるせん断応力を原料へ効率良く作用されなければならない。同じ重量の樹脂原料で比較した場合、嵩密度の低いパウダーはペレットよりも静的状態での見かけの体積が大きくなる。これは前述のとおり空気相の存在によるものであるが、このパウダーへせん断エネルギーを付与しようとした場合、パウダー粒子は嵩の空間を比較的自由に移動できるため、スクリュの回転エネルギーを思うように樹脂に与えることができず効率が低下する。つまり、原料の嵩密度が溶融可塑化挙動に大きく影響を及ぼすと考えられる。これを検証するため、可塑化挙動の観察に加えて、二軸押出機内の原料の嵩密度変化を推算することを検討した。その推算方法とは、静止状態の予備実験にて温度と圧力による嵩密度の変化を求め、そのデータをもとに二軸押出機内の可塑化部で測定した樹脂温度と圧力から押出機内部の嵩密度の算出を試みたものである。

2.1　樹脂原料

今回はパウダー原料とペレット原料の粒子径の違いによる可塑化挙動の差を確認することが目的であるため、実験には同一グレードのHDPE（高密度ポリエチレン）のパウダーとペレットを用いた。実験に用いた樹脂原料を表1に示す。今回のHDPEの真の固体密度は950kg/m^{3}であったが、パウダーの平均粒子径が0.16mmで嵩密度は427kg/m^3、ペレットの平均粒子径が3.41mmで嵩密度は583kg/m^{3}であり、粒子径によって嵩密度が大きく異なることが確認された。

表1　実験に用いた樹脂原料

Material		Particle diameter [mm]	Bulk density※ [kg/m^3]	Maker	Name of article
HDPE	Powder	0.16	427	Mitsui Chemicals, Inc.	HI-ZEX 5000S
	Pellet	3.41	583		

※Under the room temperature and the atmosphere pressure

2.2　実験方法

嵩密度が温度と圧力とによってどのように変化するかを把握するために、ヒーターで温度調節が可能な筒状容器に樹脂原料をセットし、ピストンで樹脂原料に圧縮荷重を加え、その時のシリンダ内部の容積から嵩密度を求める予備実験を行った。図1に実験装置を示す。万能試験機用に専用の冶具を作製し、荷重はロードセルで検知し、嵩密度はピストンの位置から算出した。

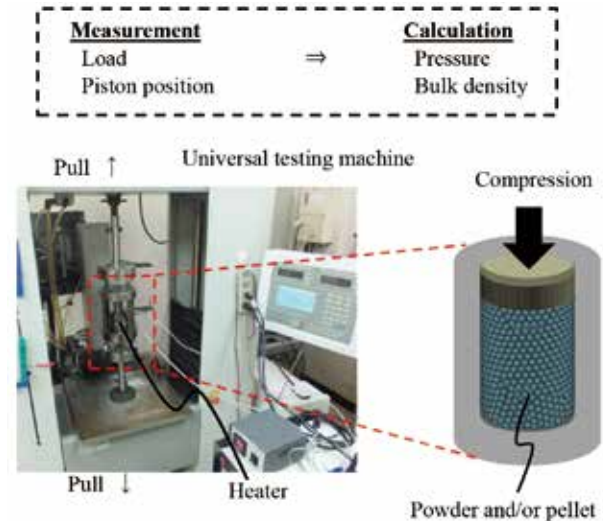



図1　予備試験装置

2.3　実験結果と嵩密度の近似

実験ではパウダーとペレットの混合比率を変化させ、計5通りの条件にて測定を行った。図2に実験結果を示す。パウダー100%では嵩密度が最も低く、ペレットの比率が高まるほど上昇する結果が得られた。いずれの結果においても、高圧になるほど嵩密度が増加し、HDPEの真の固体密度（950kg/m^3）に近づく傾向が確認された。

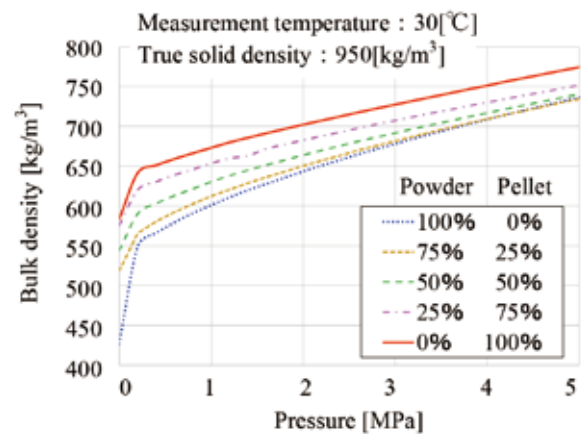



図2　HDPEの嵩密度測定結果

これら測定によって得られたデータをもとに、押出機内部の固体原料の嵩密度推算へと応用するため、Hyunら[3]により提案された以下の近似式を用いたパラメータフィッティングを行った。

$$\rho_b = \rho_s - (\rho_s - \rho_0)\exp(FP) \quad \cdots\cdots(1)$$

$$F = a_0 + a_1 T \quad \cdots\cdots(2)$$

ρ_s は固体樹脂の真密度、 ρ_o は大気圧下での嵩密度、a_0,a_1 は近似パラメータである。(2) 式は固体原料の温度依存性を考慮するものであるため、図 2 に示した常温 (30℃) での測定に加え、温度を変更した同様の測定も追加で実施した。表 2 に測定した実験データをもとにフィッティングし決定したパラメータを示し、図 3 に 30℃のフィッティング曲線を示す。パウダー比率が 100 %・50 %・0 % のいずれにおいてもフィッティング曲線は予測精度が極めて高いとは言えないものの、その圧力依存傾向は良好に捉えられているため、今回はこのパラメータを二軸押出可視化実験の検証に用いることとした。

表 2　嵩密度の近似パラメータ

Powder: Pellet	100:0	75:25	50:50	25:75	0:100
a_0 [1/MPa]	-0.0375	-0.1110	-0.0514	-0.0539	-0.1150
a_1 [1/MPa℃]	-0.0032	-0.0011	-0.0030	-0.0030	-0.0016
ρ_s [kg/m^3]	950（Solid density of HDPE）				
ρ_0 [kg/m^3]	560.9	549.7	568.1	589.2	603.4

a_0, a_1 ：Fitting parameter

ρ_s ：True solid density

ρ_0 ：The bulk density at the atmospheric pressure

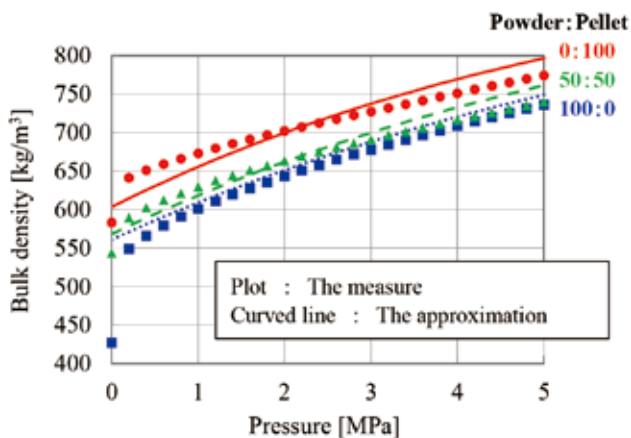



図 3　測定値と近似曲線

3.　二軸押出機の可視化実験による溶融可塑化挙動の観察

3.1　装置構成および実験条件

二軸押出機による可視化実験の装置構成を図 4 に示す。二軸押出機は TEX30αを用い、耐圧性の石英ガラスを装着したサイドグラス方式の可視化シリンダを可塑化部に使用した。樹脂原料の可塑化挙動は、サイドグラスからデジタルカメラ (EXILIM EX-F1、カシオ計算機 (株) 製) による高速度撮影にて観察を行った。可視化シリンダ上面には内部の樹脂圧力の測定が出来るように樹脂圧力計を設置した。原料供給部にはパウダーとペレットを押出機最上流部から供給するために二台の重量式フィーダを配置し、それぞれの供給比率を押出機の操作パネル上で任意に設定できる構成とした。

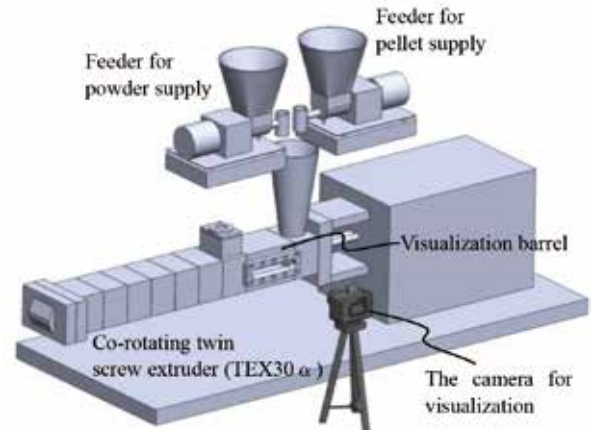



図 4　装置構成

図 5 に二軸押出機内のスクリュ構成を示す。可塑化部のスクリュ構成は、FTKD-F (Forward disk angle and Forward flight lead type Twist Kneading Disk)、FK (Forward disk angle type Kneading disk)、CK (Cross disk angle type Kneading disk)、BK (Backward disk angle type Kneading disk) の組み合わせとした。

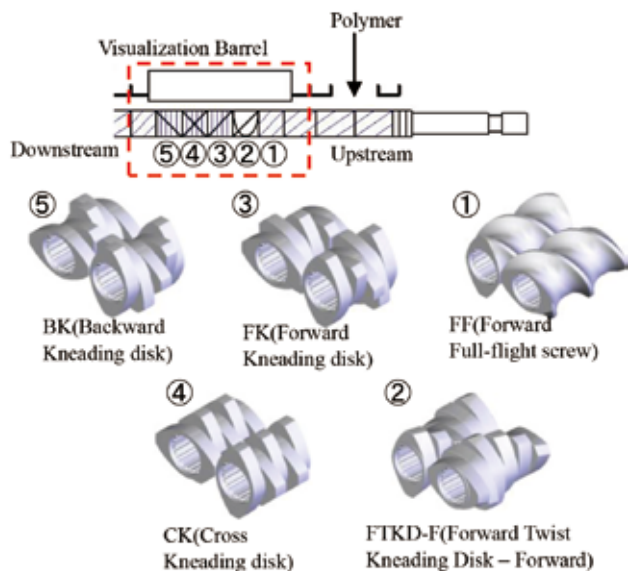



図 5　可塑化部のスクリュ構成

実験条件を表 3 に示す。押出量、二軸押出機のスクリュ回転数、シリンダ設定温度は固定とし、予備実験と同様に HDPE のパウダーとペレットの供給比率を 5 通りに変更した条件とした。

表3　二軸押出機の運転条件

Throughput	The rate of powder	pellet	Screw speed	Barrel temperature
kg/h	%	%	rpm	℃
10	100	0	50	220
	25	75		
	50	50		
	75	25		
	0	100		

3.2　圧力と温度の測定

予備実験で定義した(1)、(2)式の推算式をもとに二軸押出機内の嵩密度を予測するためには、樹脂の圧力と温度の計測が必要である。樹脂圧力は、図6に示すように15mmの測定間隔にてP1からP14までの14箇所で樹脂圧力計を用いた測定を行った。樹脂温度はサーモグラフィ(ImageIR5300、InfraTec GmbH)を用い、可視化窓から石英ガラス越しに非接触にて測定を行った。温度測定結果の一例を図7に示す。

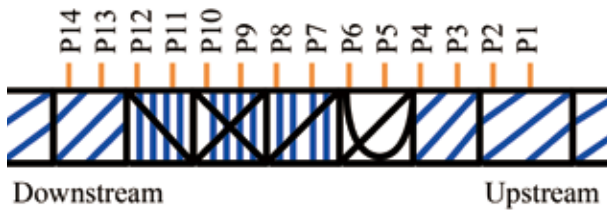



図6　圧力測定位置

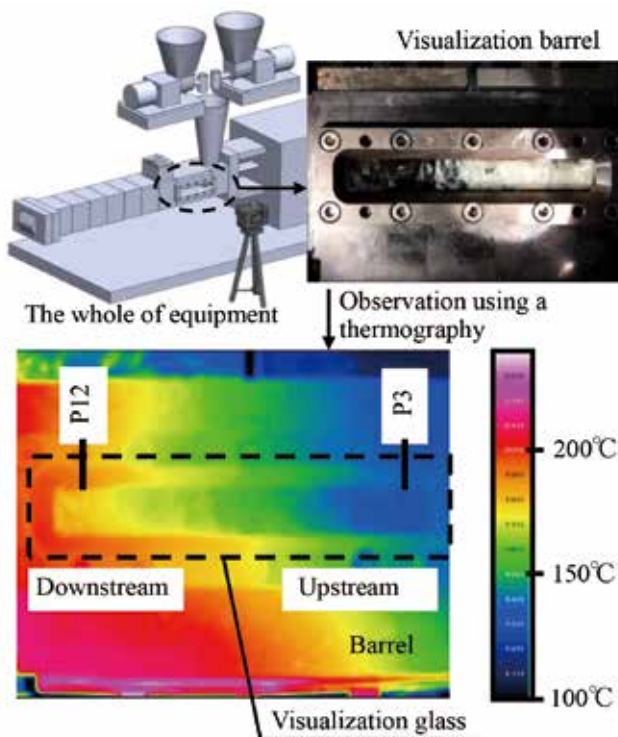



図7　温度測定結果の一例

3.3　可視化観察結果

可視化観察の結果を図8に示す。図はパウダーとペレットの比率ごとに並べて示しており、それぞれ原料の充満開始点、溶融開始点、溶融完了点を図内に記載した。パウダーの比率が増すほど充満開始点と溶融開始点が上流側へ延びる様子が確認された。溶融完了点に関しては、パウダーとペレットの比率によらず等しい位置となることが判った。今回は二軸押出機のスクリュ回転数と原料供給量が等しい条件であるため、充満開始点と溶融開始点の差異は原料形状つまり嵩密度の違いによるものである。言い換えれば、可視化シリンダ内に存在する樹脂自体の体積は全条件で等しいはずであるが、充満長が異なって見えるのは、パウダーが充満開始領域で多くの空気相を含んでいるためと考えられる。

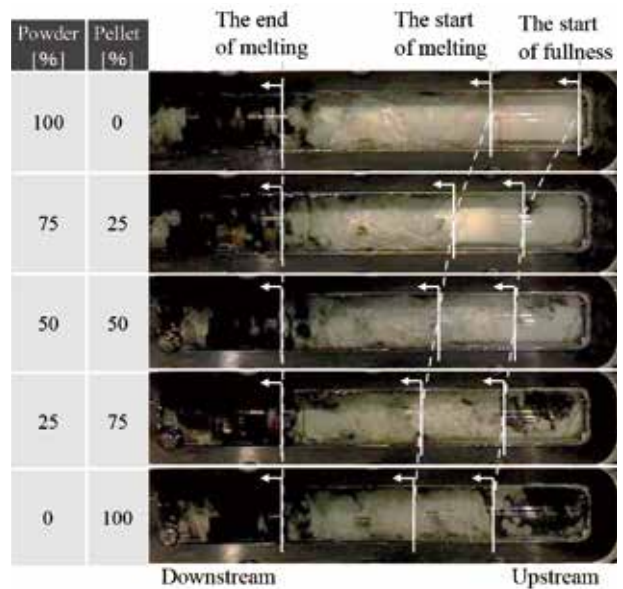



図8　可塑化部の可視化結果

3.4　圧力と温度の測定結果

樹脂圧力の測定結果を図9に示す。P3からP5にかけて圧力が急激に上昇し、P6以降で徐々に下降する挙動が確認された。また、パウダー比率が多いほうが高く広い圧力分布を示すことが確認された。

サーモグラフィによる温度測定結果から圧力観測点の樹脂温度を抽出したものを表4に示す。下流(P14)に近づくほど温度が上昇し、またペレット比率が多いほうが高温となる傾向が確認された。

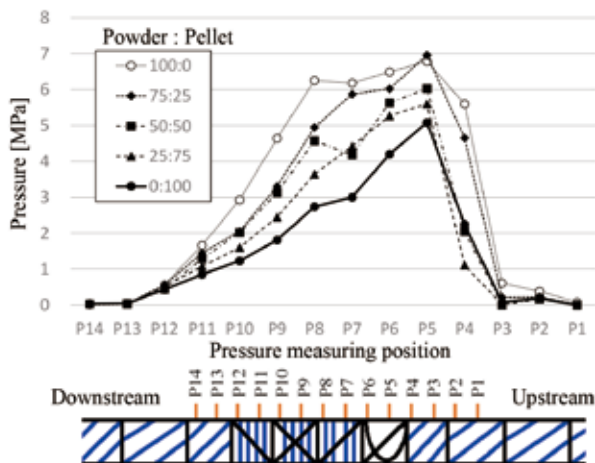



図 9　圧力測定結果

表 4　圧力観測点の樹脂温度

Resin temperature [℃]		Powder : Pellet				
		100 : 0	75 : 25	50 : 50	25 : 75	0 : 100
Pressure mesuring position	P1	113.3	105.7	122.5	129.1	132.4
	P2	113.3	105.7	122.5	129.1	132.4
	P3	113.3	105.7	122.5	129.1	132.4
	P4	126.2	119.7	123.7	133.9	133.3
	P5	140.8	129.7	137.0	148.2	141.3
	P6	146.1	143.7	148.7	150.9	145.6
	P7	150.2	148.0	152.4	154.2	150.8
	P8	154.2	151.8	156.8	159.6	162.7
	P9	158.9	155.7	161.3	164.1	165.9
	P10	162.8	160.6	164.6	168.1	169.9
	P11	169.9	165.6	170.2	174.3	171.9
	P12	178.0	173.1	176.7	181.1	180.2
	P13	178.0	173.1	176.7	181.1	180.2
	P14	178.0	173.1	176.7	181.1	180.2

3.5　可塑化部の嵩密度変化

図 9 に示した圧力と表 4 に示した温度の測定結果から、二軸押出機内可塑化部の嵩密度を推算した結果を図 10 に示す。パウダー 100% では溶融開始時に 900kg/m^3 まで嵩密度が増加する推算結果となったが、これは HDPE の真の固体密度 950kg/m^3 の約 95% に相当する値である。ペレット 100% では可塑化時に 850kg/m^3（真の固体密度の約 90%）まで嵩密度が増加する推算値となった。

今回の原料・装置構成・運転条件においては、パウダーとペレットともに嵩密度が 850kg/m^3 以上（真の固体密度の 90% 以上）になり溶融が開始するとの結果となった。つまり、真の固体密度の 90% がしきい値となり、樹脂原料の嵩密度がこのしきい値を超えた時点で溶融可塑化が開始されたといえる。この挙動は、原料の粒径によらず嵩に含まれる空気相が完全充満部の圧力上昇に伴い上流側へ排除され、徐々に嵩密度が上昇し樹脂が真の固体密度に近くなるまで圧縮された後に溶融が開始するためと推察できる。これは、スクリュ回転によるせん断エネルギーを十分に授受するためには、固体樹脂相がある程度圧縮され緻密化される必要があると考えられる。今回確認された可塑化開始の嵩密度のしきい値の存在から、二軸押出機内での可塑化開始には嵩密度の上昇が必須であり、そのためには可塑化混練部で樹脂圧力を上昇させるためのスクリュ構成が必要であることが示唆された。

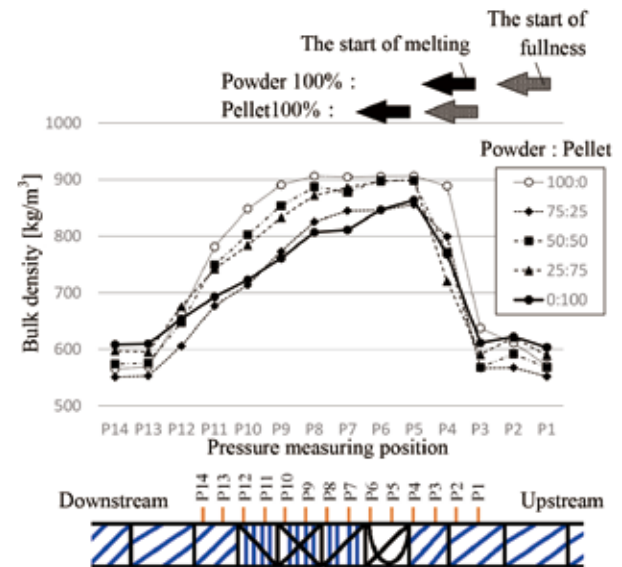



図 10　嵩密度の推算結果

4.　結　　言

本研究では、二軸押出機を用いた可視化実験を実施し、原料形状がパウダーとペレットの場合の可塑化挙動の違いを可視化観察した。また、可塑化時の嵩密度変化の推算を試み、可塑化挙動の考察を行った。可視化観察の結果、ペレットと比較しパウダーでは充満区間と溶融区間が延長される結果が得られた。嵩密度推算の結果、二軸押出機内で原料の嵩密度が真の固体密度の 90% 以上のしきい値を超えることで溶融可塑化が開始することが示唆された。また、ペレットと比較しパウダーでは可塑化の阻害要因となる空気相の排除のため、より高い圧縮力つまり混練圧力が必要であることが判明した。

今後は、樹脂の溶融可塑化挙動について樹脂が溶けるメカニズムを追求するため、今回実施した可視化実験をさらに活用し、より詳細な挙動を把握するための計測技術を高める方針である。また、計測により得られたデータの理論化・数式化を行い、CAE による予測技術の向上へと繋げていく所存である。

参 考 文 献

(1) 永井光男、小田吉昭、酒井忠基、北畠直文、土井悦四郎:
"食品研究用小型二軸エクストルーダーの開発とその応用",
日本製鋼所技報, No.45 (1991), p.40-46
(2) 橋本憲明、柿崎淳:"可視化シリンダによる二軸押出機内の樹脂挙動観察", 日本製鋼所技報, No.48 (1993), p.80-84
(3) Hyun, K.S. and Spalding, M.A.:"Bulk density of solid polymer resins as a function of temperature and pressure", Polym. Eng. Sci., No.30 (1990), p.571-576

BOPP フィルム用横延伸機加熱ノズルの開発
ー熱伝達率改善によるフィルム特性の向上ー

Development of the Nozzle of Transverse Direction Stretching for BOPP Film
− Improvement of Heat Performance and Film Quality −

博士（工学）串﨑　義幸 *
Dr. Yoshiyuki Kushizaki

博士（工学）時久　昌吉 **
Dr. Masayoshi Tokihisa

要　旨

一般的に、二軸延伸ポリプロピレン（BOPP）フィルムは高ライン速度にて、生産される。そのため、フィルムと加熱エア間において高い熱伝達率と温度の均一性を有するBOPP 横延伸機が必要となる。そこで、本報告では、気流解析を用いて、加熱エアの噴出穴配列とその流路形状を最適化した新しい加熱ノズルを開発した。この新しい加熱ノズルは、従来ノズル形状に比べて、熱伝達率が 27 ％向上し、フィルム幅方向の物性ムラの原因であるボーイング量が 17％低減することがわかった。

Synopsis

Bi-axially oriented Polypropylene (BOPP) film is usually produced under the high line speed. High heat transfer coefficient between heat air and film, and the uniformity of temperature that along the transverse direction (TD) is need for the transverse stretching machine for BOPP film. We develop the new nozzle to optimized that hole arrangement and flow channel near the air outlet by using air flow analysis. The heat transfer coefficient of new nozzle is 27 % higher than conventional nozzle. The bowing distortion is 17% less than conventional nozzle.

1.　はじめに

近年、プラスチックフィルムの生産規模は、プラスチック製品全体の約40 ％を占めるほどに成長している[1]。その中でも、食品包装用途として、二軸延伸ポリプロピレン（以下、BOPP）フィルムの需要は高く、2013 年の世界需要は約 647 万トンにも達した。さらに、現在も新興国において、年間 10 ～ 20 ％程度で増加中である。

このBOPP フィルムは、図1に示すように、押出機、キャスト成形機、縦延伸機、横延伸機、および巻取り機から構成される装置で製造され、製造方法は次のような工程がある。まず、押出機にてポリプロピレン樹脂を溶融・可塑化する。次に、溶融・可塑化した樹脂を、キャスト成形機の冷却ロールにて冷却し、シート状に成形する。その後、縦延伸機と横延伸機によって、フィルム送り方向（以下、MD）とフィルム幅方向（以下、TD）にシートを延伸することで、厚み約 20　μm のフィルムにし、巻取り機で巻き取る。これらの工程で、横延伸機は、フィルムを延伸することで張力が加わった方向に分子鎖を整列させ、フィルムの引張強度などの機械特性を向上させる重要な役割を果す装置である。

図 2 に示すように、横延伸機は、役割の異なる予熱、延伸、熱固定、中間、および冷却の 5 つの区間から構成され、それぞれ仕切り板で区切られる。また、横延伸機

*：広島研究所
Hiroshima Research laboratory
**：研究開発本部
Research & Development Headquarters

のオーブンは、各区間を通過するフィルムを所定の温度まで加熱するために、加熱エアを噴き出す加熱ノズルを有している。予熱区間においては、クリップに両端を把持されMDに搬送されるフィルムを、加熱ノズルにて、延伸温度まで加熱する。延伸区間では温度を一定に保持しながら、TDに徐々にクリップ間隔を広げることで、フィルムを延伸する。熱固定区間では、延伸区間より高い温度にフィルムを加熱し、延伸することで発生したフィルムの残留応力を取り除く役割を果す。最後に、冷却区間では、フィルムを室温まで冷却する。この中で特に、予熱区間での加熱ノズルの加熱効率や熱量の均一性が重要で、限られた長さで、フィルムを設定温度にムラなく加熱できなければ、後段の延伸時に伸びムラが生じる。このフィルムの伸びムラは、フィルムの機械特性のムラであり、最終的には、巻取り時にフィルムしわを引き起こす、いわゆるボーイングと呼ばれる不良現象である(2)。加えて、近年では、BOPPフィルムの生産性向上のため、ライン速度500 m/min、最終フィルム幅10 m以上と高速・幅広化が進んでおり、ますますボーイング対策の必要性が高まっている。

この対策として、フィルム全面を限られた予熱区間で均一に加熱するために、加熱ノズルの加熱効率を向上させ、かつ熱量を均一とするような、ノズル穴の配列や形状を検討し、加熱性能を評価したので報告する。

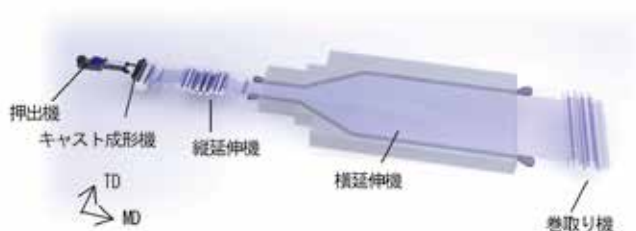



図1　BOPP製造装置

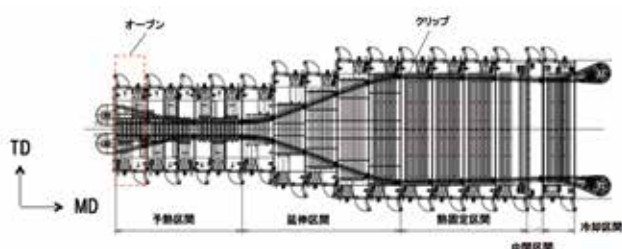



図2　横延伸機の構成

2.　横延伸機用加熱ノズルの熱効率向上

2.1　加熱ノズルの標準形状

図3に、図2中に破線で表示した予熱区間のオーブンの模式図を示す。オーブンはファンと加熱ノズルから構成される。ファンはオーブンの左右に配置され、加熱エアをノズル内部に供給する機構である。加熱ノズルは、図4に示すように、フィルム上下面に対して、それぞれ複数の穴が穿孔され、ノズル間を走行するフィルム面に対して、加熱エアを噴出することでフィルムを加熱する機構である。

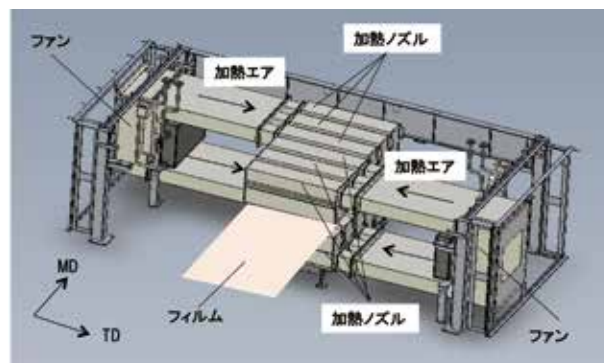



図3　オーブンの構造

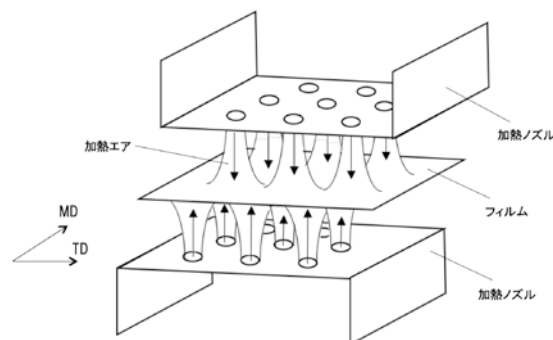



図4　加熱ノズルの流れの模式図

ところで、当社製のBOPP用横延伸機の標準ノズルの加熱エアの噴出穴は、図5(a)に示すように噴出穴が1つのノズルでMDに3列配列している。また、図5(a)中にて、破線で表示した図5(b)の穴配列に着目すると、MDにフィルムを搬送した際に1列目と3列目の噴出穴がTDで同一座標となることからフィルムの同じ箇所を何度も加熱することになる。また、標準ノズルの噴出穴間隔は、MDに140 mmピッチであるのに対して、TDは80 mmピッチであり、均等である。

そのため、横延伸機の高速化・幅広化の市場要求を満たすには、標準ノズルの噴出穴配列を最適化し、加熱の効率と均一性を向上させる必要がある。

(a)　噴出穴配列　　(b)　噴出穴間隔

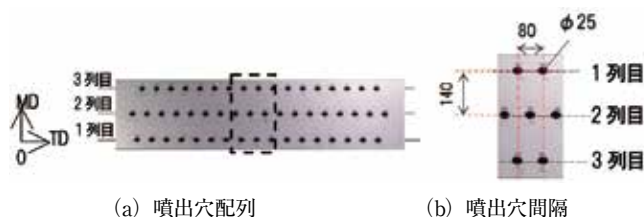



図5　標準ノズル穴配列・穴寸法

2.2　噴出穴配列の検討

(1) 噴出穴配列

噴出穴を複数個有するような加熱ノズルは、穴配列や穴径などの幾何学的因子によって、熱効率が複雑に変化する。そこで、Martin らは、ノズル穴の断面積とフィルム加熱面積の比から幾何学的因子を g と定義し、加熱ノズルの熱効率の指標の一つである平均熱伝達率と g との間に相関性があることを実験で明らかにしている[3]。そこで、本報告では、g を用いて、穴配列の検討を行った。

標準ノズルの g は、図 6 (a) に示すように、3 点の噴出穴を結んだ三角形（この部分がフィルム加熱面積）とその噴出穴の断面積の比から、表 1 の計算式を用いて算出され、g の値が大きい程、平均熱伝達率が高いことを示す。このとき、図 6 (a) の穴配列を標準穴配列と定義する。表 1 に示すように、標準ノズル穴配列では、加熱面積が MD に長い二等辺三角形となるため、g の値が 0.043 となる。そこで、図 6 (b) に示すように、g を増やすために穴配列と穴径を変更した。この穴配列を最密穴配列と定義する。この最密穴配列は、加熱面が 1 辺の長さが R の正三角形となるよう、穴間隔を変更し、さらに、加熱ノズルの限られた面に、噴出穴をより多く配列できるよう、穴径を 25 mm から 20 mm に変更した。表 1 に示すように最密穴配列の g は 0.050 となり、標準穴配列に比べて、1.2 倍となり、平均熱伝達率が向上すると推察される。

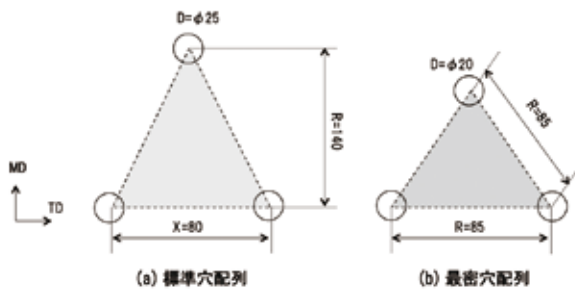



図 6　加熱ノズルの噴出穴配列

表1　熱効率の形状パラメータ g の比較

項目＼特性	算出方法	計算値
標準穴配列	$g = \frac{\pi D^2}{4XR}$	0.043
最密穴配列	$g = \frac{\pi}{2\sqrt{3}}(\frac{D}{R})^2$	0.050

(2) 噴出穴配列の組み合わせ方法

広い加熱面積を加熱する場合は、最密穴配列を 6 つ組み合わせて作った正六角形とする必要がある。最密ノズル穴配列の組み合わせの一例として、図 7 (a)、(b) に示すように MD に対して 3 列ノズル穴を配列する場合と MD に対して 5 列ノズル穴を配列する場合が存在する。いずれも、フィルムが MD に搬送されたとき、同じ箇所を加熱することとなり、非効率かつ熱量ムラの原因となる。そこで、図 8 に示すように最密穴配列を MD から TD に反時計周りに傾斜角 θ だけ回転させ、すべてのノズル穴が TD に対して所定のノズル穴間隔 x で均等に配列されるようにした。

(a) MD に 3 列の場合　(b) MD に 5 列の場合

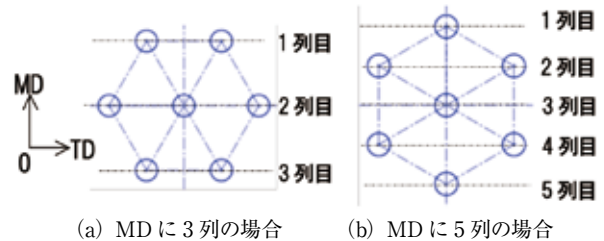
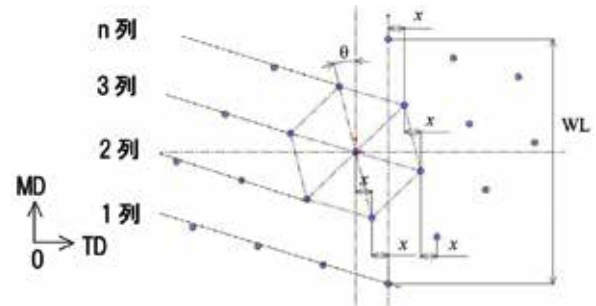



図 7　最密穴配列の組み合わせ例

図 8　最密穴配列の組み合わせの最適化

ここで、MD に位置する噴出穴が複数列に、間隔を空けて並ぶ際の噴出穴の配列数を n 列としたとき、傾斜角 θ は式 (1) で表現可能である。

また、WL を噴出穴の配列幅とすると、噴出穴間隔 x は式 (2) で表現される。これらの式 (1)、(2) を基に、噴出穴間隔 x、傾斜角 θ を決定した、噴出穴配列・穴寸法を図 9 に示す（以下、最密ノズル）。

$$\theta = \cos^{-1}\left[\frac{2n^2-3n+1}{2(n-1)\sqrt{n^2-n+1}}\right] \quad \cdots\cdots(1)$$

$$x = \frac{wL}{n-1}\sqrt{(n-1)^2-\left(\frac{2n^2-3n+1}{2\sqrt{n^2-n+1}}\right)} \quad \cdots\cdots(2)$$

(a) 穴配列　(b) 穴寸法と間隔

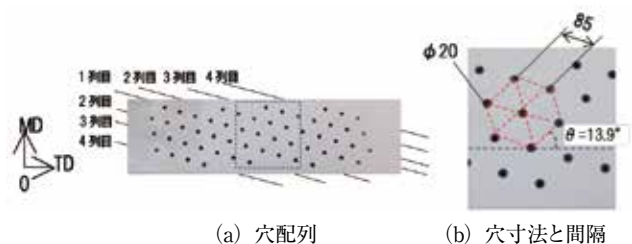



図 9　最密ノズルの穴配列・穴寸法

(3) 気流解析による風圧分布の比較

気流解析にて、標準ノズルと最密ノズルの噴出穴からフィルム面に噴き出された加熱エアがフィルム面に衝突した際に、作用する風圧を比較した結果を図 10 (a)、(b) に示す。なお、解析は、熱流体問題とし、計算手法には、有限体積法を、乱流モデルには K-ε モデルを採用し、気流解析ソフト Solidworks Flow-simulation を用いた。また、解析条件は、加熱エアの噴出し風速を 20 m/s とし、フィルム走行を考慮し、MD に対してフィルムが 200 m/min で搬送される条件を設定した。

標準ノズルは 1 列目と 3 列目のノズル穴から噴出された加熱エアがフィルム面に到達せず、風圧が低い箇所が存在する。また、ノズル穴直下とノズル穴間では風圧にムラが生じるため、フィルム面全体の風圧分布が不均一である。一方、図 10 (b) の最密ノズルはフィルム面で全幅において、標準ノズルよりも風圧が均一であり、フィルムがノズルを通過した際に全幅へ均一な熱量が加えられる形状となっている。

(a) 標準ノズル

(b) 最密ノズル

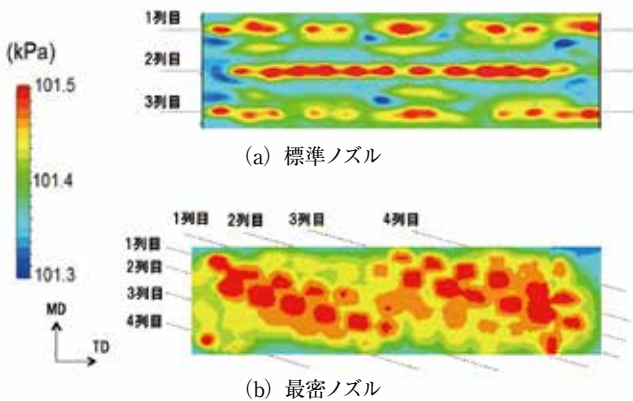



図 10 フィルム面に加わる風圧分布

2.3 加熱ノズルの性能比較

(1) 解析手法

解析は、生産機の一部を模した図 11 の実験装置を対象として、フィルム表面の平均熱伝達率 h にて加熱ノズルの性能を評価した。解析手法は前節と同様である。解析の境界条件は、各ノズル穴から風速 20 m/s の加熱エアが噴き出される条件とし、フィルムのライン速度を 50 ～ 200 m/min と種々に変化させて、フィルム面に設定し、オーブン入口・出口の面には、大気圧力条件を設定した。

平均熱伝達率 h は、フィルム境界温度 T_∞ と熱流束 q を解析で求め、それらの値と、フィルム面の温度 T_w=20 ℃を式 (3) に代入することで算出した。なお、解析では、フィルム近傍で温度は不連続となるため、解析値と単一噴流の経験式[4] が一致するフィルム面から 6 mm 上部の T_∞ と q を採用した[5]。

$$h = \frac{q}{T_\infty - T_w} \quad \cdots\cdots(3)$$

(2) 実験手法

実験においても同様に図 11 に示す実験装置を対象にフィルム表面の平均熱伝達率 h を評価した。

実験は、放射温度計 (株式会社キーエンス社製：FT-H20) を筐体入口と出口に設置することで、走行するフィルム中央部のフィルム入口温度 T_{in}、フィルム出口温度 T_{out} を測定した。なお、放射温度計での温度測定が容易となるように、白濁した PP フィルムを使用し、その際の放射温度計の放射率は 0.9 とした。フィルム温度測定の際は、フィルム走行速度を 25、50、75、100 m/min に変化させた。また、平均熱伝達率 h は、以下に示す手法により算出した。まず、式 (4) に放射温度計で測定した T_{in}、T_{out}、PP 物性である比熱 C、密度 ρ とフィルムの加熱体積 V を代入することで、熱量 Q を求めた。さらに、式 (6) より、式 (5) から求めた熱量 Q とフィルム加熱面積 A、フィルムが装置を通過する時間 t から、ノズルから噴き出した加熱エアの平均温度 T_{set} と対数平均温度 T_m を求めることで、平均熱伝達率 h を算出した。なお、対数平均温度は、式 (6) より算出した。

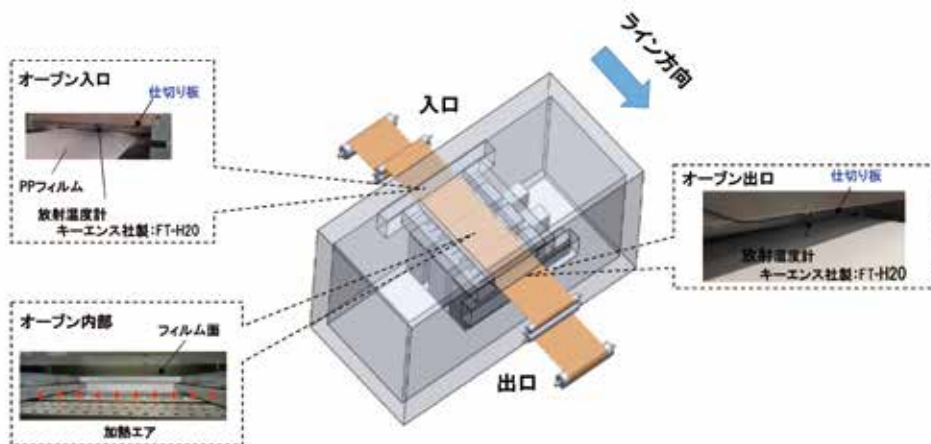



図 11 熱伝達率評価装置

$$Q=\rho VC(T_{out}-T_{in}) \quad \cdots\cdots(4)$$

$$h=\frac{Q}{t\,A(T_{set}-T_m)} \quad \cdots\cdots(5)$$

$$T_m=\frac{(T_{set}-T_{out})-(T_{set}-T_{in})}{\ln\frac{(T_{set}-T_{out})}{(T_{set}-T_{in})}} \quad \cdots\cdots(6)$$

(3) 評価結果

前述した解析と実験の手法にて平均熱伝達率 h を算出した結果を図 12 に示す。実験では、ライン速度 25 ～ 100 m/min までの、平均熱伝達率 h の測定を行なった。図 12 に示すように、測定した範囲内で実験値と解析値は比較的良好に一致している。このことより、ライン速度が速くなった場合においても標準ノズルよりも最密ノズルの平均熱伝達率が高く、ライン速度の増加による平均熱伝達率の低下が小さいことがわかった。

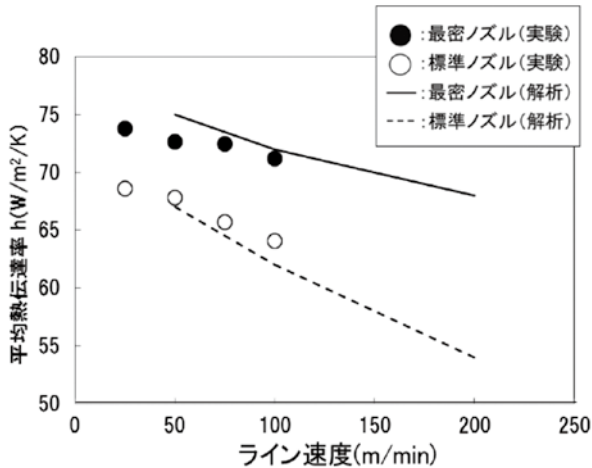



図 12　ライン速度と平均熱伝達率

3.　加熱ノズル出口部の縮流対策

3.1　ランド延長による縮流対策

前章では平均熱伝達率を向上させるため、ノズルの穴配列について検討したが、本章ではノズルの穴形状についての検討を行う。一般的に、ノズル噴出穴の出口 (以下、ランド) で流路が急激に縮小するオリフィスノズルでは、ランドで縮流が生じ、噴出風速が乱れることが知られている。この問題に対して、ランドを延長することで、縮流の影響を小さくし、噴出風速を均一化できるとの報告がある[6]。BOPP 加熱ノズルもランドで流路が急激に縮小するため、同様の手法を用いることで、出口風速が均一となることが期待される。

そこで、ランド延長の効果を検証するため、ノズル穴 1 つ分を解析対象として、ランド長 L=2 mm、10 mm の場合のノズル出口の加熱エアの風速分布を気流解析によって求めた結果を図 13 (a)、(b) に示す。なお、気流解析は、2.2 節と同様の条件とした。図より、ランド長さが 2 mm の場合は、加熱エアがフィルム面に衝突する前に、静止エアとの衝突によって、風速が減衰することがわかった。一方、ランドを 10 mm とした場合、風速の減衰が少なく、ノズル穴のランド形状を変更することでフィルム面での平均熱伝達率が向上すると推察される。

(a) ランド長 :L=2mm　(b) ランド長 :L=10mm

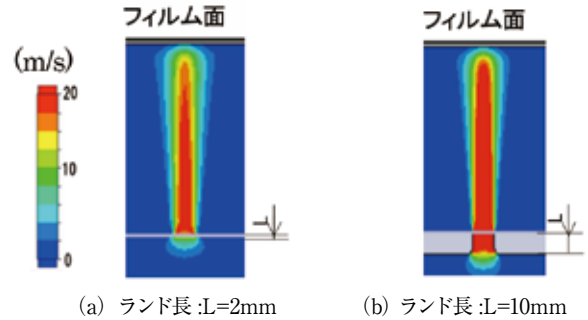



図 13　整流板の効果検証

3.2　最適ランド長の検討

前節の結果から、ノズル出口部の縮流に対して、ランドを設置することが有効であることがわかった。そこで本節では、3.1 節と同様にノズル穴 1 つ分を解析対象とし、最適なランドの長さの影響を検討した。具体的には、ノズル径 D を 20 mm 一定、ランド長さ L を種々に変化させた際のノズル穴出口の加熱エアの風速分布とノズルとフィルム面の平均熱伝達率 h を算出した。なお、風速分布や熱伝達率は 2.2 節や 2.3 節と同様の手法で求めた。

図 14 は、ランド長 L とノズル径 D の比 L/D=0.1、0.5、2.0 の際の噴出穴での風速分布を示す。L/D=0.1 の際は、噴出穴中央での風速の偏差が ± 10％以内に収束する領域 (ポテンシャルコアが存在する長さ) が X_1=14 mm となる。なお、このポテンシャルコアが存在する長さが大きいほど、加熱エアとフィルム間の平均熱伝達率が高まる[7]。一方で、L/D=0.5 の場合は、ポテンシャルコアが存在する領域 X_2=18 mm と L/D=0.1 の場合に比べて、約 1.3 倍程度大きい。一方、L/D=2.0 となるとランド内にて加熱エアが発達流れとなるため、ポテンシャルコアが存在する領域は小さくなることがわかる。

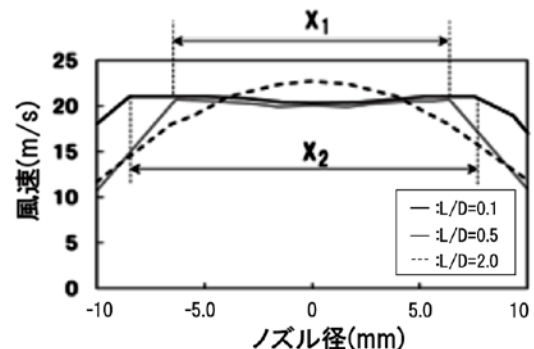



図 14　加熱エアの噴出し速度分布

図 15 には L/D=0 ～ 4.0 まで種々に変化させた際の平均熱伝達率の解析結果を示す。なお、フィルムのライン速度は 200 m/min の条件で解析を実施した。図 15 より、L/D = 0.5 で平均熱伝達率 h が極大値となり、その後、平均熱伝達率 h は L/D の増加によって緩やかに低下することが分かる。

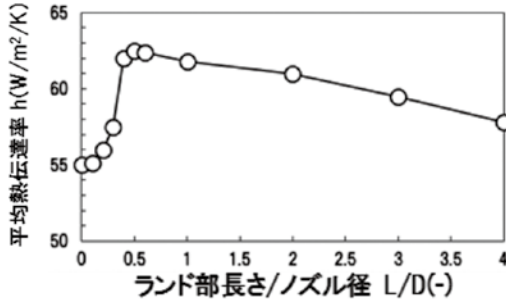



図 15　L/D と平均熱伝達率

4.　生産ラインへの加熱ノズル搭載による検証

4.1　搭載する加熱ノズルの穴配列・形状検討

前章まで、穴配列の最適化や噴出穴の風速の均一化を図ったが、本章では、これらの解析・実験結果を基に、実機へ搭載可能な加熱ノズルの穴配列と形状を検討し、その加熱性能を評価した。実機に搭載する具体的なノズル形状として、図 16 に示すように、最密ノズルの噴出穴のランドが L/D=0.5 となるよう穴配列・形状とした（以下、改良ノズル）。また、図 10 に示す熱伝達率評価装置にて、2.3 節と同様な実験方法で、ライン速度は 100 m/min の条件とし、熱伝達率を求め標準ノズルと改良ノズルの熱効率の比較を行った結果を図 17 に示す。標準ノズルに比べて改良ノズルは熱伝達率が 27 %向上することがわかった。

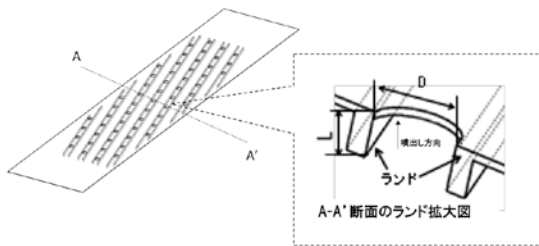



図 16　改良ノズル

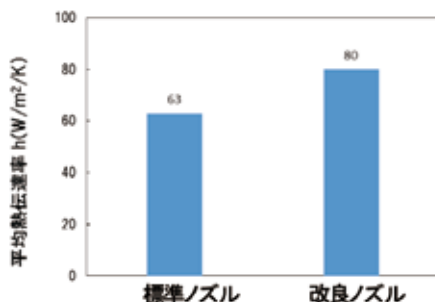



図 17　平均熱伝達率の比較

4.2　搭載した加熱ノズルの性能評価

実機ではフィルムを連続生産するため、ノズルとフィルム間の熱伝達率を直接的に、評価することが困難である。そこで、ノズル加熱効率の向上により、延伸時のフィルム温度ムラが解消され、延伸ムラが低減することで、フィルム TD 全幅の物性が向上すると仮定し、ボーイング量（フィルムの分子配向を判断する指標）にて、間接的にノズル性能の評価を行った。まず、実機生産ラインを対象に、予熱区間の一部の標準ノズルを、改良ノズルに変更した場合のボーイング量を既報の解析方法[8]にて求めた（図 18）。

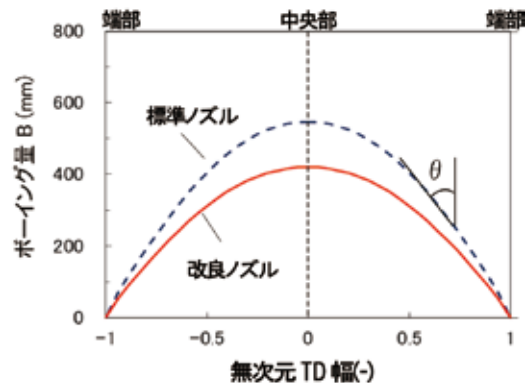



図 18　ボーイング量の比較（解析）

図 18 の解析結果に示すように、ボーイング量はフィルム中央部で極大となり、フィルム端部に向けて小さくなる。そこで、フィルム中央部のボーイング量で両ノズルの性能評価を実施した。その結果、改良ノズルを用いた場合のフィルム中央部のボーイング量が 19% 低減することがわかった。

解析にて、良好な結果が得られたため、実機に改良ノズルを搭載し、その性能の評価を行った。実験では改良ノズルの搭載前後でフィルムサンプルを採取し、複屈折からボーイング量を実測した。なお、ボーイング量 B は、図 19 に示す式を用いて分子配向角 θ と TD の測定ピッチ P から算出した。図 19 に示すように、実験では中央部近傍の最大ボーイング量は 17 % 程度減少し、解析と一致する結果を得た。

以上より、改良ノズルを BOPP 横延伸機用加熱ノズルとして採用すると、加熱エアとフィルム面との熱伝達率が向上することがわかった。また、フィルム面の熱量が均一となるため、フィルム幅方向での物性ムラが低減することが実証できた。

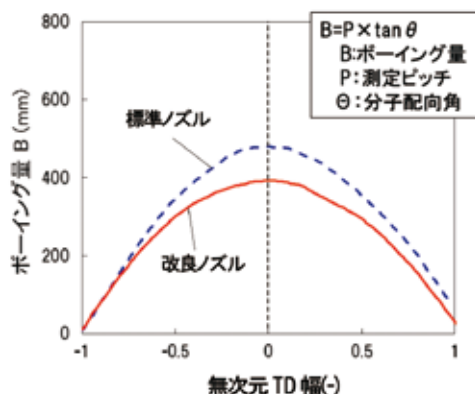



図 19　ボーイング量の比較（実験）

5. 結　　言

ノズル穴配列と形状を検討し、熱伝達率の予測と評価試験を実施した結果、標準ノズルに比べて熱伝達率が 27 % 向上する改良ノズルを開発した。この改良ノズルを実機の予熱区間の一部に搭載し、ボーイング量にて、ノズル性能を評価した結果、フィルム中央のボーイング量が 17 % 低減することがわかった。フィルム物性による間接的な評価であるが、改良ノズルは標準ノズルに比べて、熱効率が高いことが実機でも実証された。

今後は加熱ノズルだけでなく、横延伸機の更なる改良・改造の実施により、装置の生産性向上を目指す。

参　考　文　献

(1) 経済産業省生産動態統計、統計表一覧（紙・印刷・プラスチック・ゴム製品統計）:http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/06_kami.html
(2) 野々村 千里：博士学位論文要旨（2002），p.34-44
(3) Martin:H., Advances Heat Transf, Vol.13（1977），p.1
(4) 田口 裕也：機械工学便覧『流体工学』、α 4-37
(5) J. N. B. Livingood and P. Hrycak：A literature survey, NASA TM X-2778,（1973）
(6) Msayoshi Tokihisa, Yoshiyuki Kushizaki, Hideki Tomiyama, Yousuke Yamamoto, Toshiro Yamada：Journal of Polymer Engineering, Vol.30（2010），Nos. 3-4, p.245-274
(7) 鬼頭 みずき：博士学位論文（2003），p.64-108
(8) Msayoshi Tokihisa, Yoshiyuki Kushizaki, Hideki Tomiyama, Yousuke Yamamoto：International Polymer Processing : Vol. 26（2011），No.5, p.498-507.

セミプレグを用いた革新的 CFRTP 成形加工技術の開発

Development of Innovative Molding Processes for Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics Using Semi-preg

大野　秋夫*
Akio Ohno

安江　昭*
Akira Yasue

井上　茂樹*
Shigeki Inoue

西田　正三**
Shoso Nishida

羽生　芳史***
Yoshihumi Hanyuu

要　　旨

自動車分野では、車体の軽量化による燃費向上への取り組みが積極的に進められており、生産性やリサイクル性の観点から炭素繊維強化熱可塑性樹脂（CFRTP）が注目されている。しかし、熱可塑性樹脂は熱硬化性樹脂と比べて粘度が高いため、炭素繊維への含浸が容易ではない。そこで当社では、含浸性を改善した高性能 CFRTP 基材であるセミプレグの製造技術と、Heat & Cool 金型を用いてセミプレグを一次賦形するダイレクト賦形技術を開発したので報告する。さらにこの一次賦形品にリブやフレームなどの二次成形をする CFRTP 複合成形システムについても紹介する。

── Synopsis ──

In the automotive industry, improvements in the fuel efficiency through reducing the body weights have been actively attempted, and attention has been paid on CFRTP (carbon fiber reinforced thermoplastic) from aspects of productivity and recyclability. However, it is very difficult to impregnate the thermoplastic resin into carbon fiber preforms because the viscosity of the thermoplastic resin is higher than that of the thermoset resin. We have developed the fabrication technology of CFRTP Semi-preg, where the resin impregnation has been dramatically improved, and the direct molding technology for the primary forming of the Semi-preg using a Heat & Cool mold. This report describes these technologies. Moreover, it introduces the latest CFRTP Hybrid Molding System which integrates the direct molded Semi-preg with ribs and/or frames as the secondary forming.

1.　緒　　言

地球温暖化問題の解決に向けて CO_2 排出量の削減が求められている。特に化石燃料を消費して CO_2 を排出する航空機、自動車といった運輸部門では、化石燃料の消費量削減が強く求められている。航空分野では、化石燃料消費量の削減に有効な機体の軽量化手段として、熱硬化性樹脂を炭素繊維に含浸させた炭素繊維強化樹脂（CFRP）の採用が進んでいる。一方で、低コスト、大量生産が求められる自動車分野では、成形の容易性、リサイクルが可能などの観点から、熱硬化性樹脂ではなく、熱可塑性樹脂を含浸させた炭素繊維強化樹脂（CFRTP）が求められている。しかし、熱可塑性樹脂は熱硬化性樹脂に比べて粘度が高く、炭素繊維束の隙間への樹脂の効

*：広島研究所　Hiroshima Research laboratory
**：広島製作所　射出機械部　Injection Molding Machinery Engineering Department, Hiroshima Plant
***：(株) サン・テクトロ　Sun-tectro. Ltd.

率良い含浸は容易ではないため、これらを解決する製造プロセスが求められている。またCFRTPの成形品は、用途によって、その形状や、求められる機械的特性が異なるため、用いられる繊維基材の形態や、その成形加工方法も異なる。特に、付加価値の高い成形品では、複数の成形加工技術を組み合わせて製造する場合もあり、様々な基幹技術が求められる。

当社では、「素材とメカトロニクスの総合企業」として、大型鍛鋼部材や特殊鋼の供給と、押出機やフィルム製造装置、射出成形機、中空成形機といった幅広い熱可塑性樹脂の成形加工機の製造販売を行っている。これらの研究開発で培われた鋼と機械、およびポリマープロセシングなどの独創技術を融合させて開発した、含浸性を改善した高性能CFRTP基材であるセミプレグと、CFRTP成形加工技術を用いた最新複合成形システムについて紹介する。

2. CFRTP基材の製造技術

2.1 従来の製造方法の課題

含浸とは、繊維間に存在している空隙を樹脂で満たすことであり、含浸させる環境が大気中の場合には、空気と樹脂を置換することといえる。これが不十分だと、図1の黒丸部に示すように繊維と樹脂とが密着していない空隙（ボイド）が残存し、CFRTPの機械的特性が低下する一因となる。

従来のCFRTP基材（プリプレグ）の製造方法では、フィルム状の樹脂基材を繊維基材に重ねて加熱溶融させる（フィルムスタッキング法）、またはTダイからフィルム状に溶融樹脂を押出して繊維基材上に重ねるなどして、フィルム状の溶融樹脂で繊維基材の表面を覆った後に加圧して含浸させている[1]。そのため繊維基材内の空気が抜けにくく、ボイドが発生しやすいという課題がある。

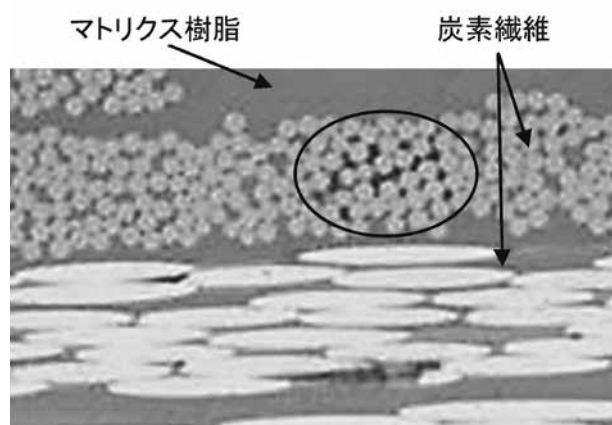



図1　CFRTP基材中のボイドの例

2.2 セミプレグの製造方法とその特長

そこで当社では、帯電させたパウダー状の樹脂を、炭素繊維（CF）基材の表面に静電力を利用して付着させ、その後、赤外線等で加熱して付着した樹脂を溶融させることで、樹脂をCF基材に溶着させると同時にCF基材に半含浸させるCFRTP基材（セミプレグ）の製造方法を開発した。概要を図2に示す。CF基材の表面は、樹脂が部分的に開口（樹脂間の隙間）を有した状態で半含浸しており、CF基材内の空気が抜けやすい。また、表面に樹脂が溶着して半含浸した状態であるため、セミプレグは図3に示すように高い柔軟性を有する。

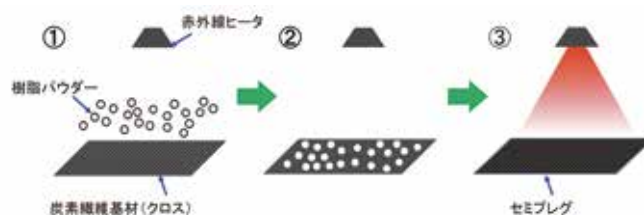



図2　セミプレグの製造方法

このセミプレグの製造方法は、以下の特長を有する。

①使用するCF基材の形状は織物（クロス）だけではなく、一般に数十mmの幅でCFを一方向に並べたUDテープ、ランダムな配向でCFを堆積させたマットなど、幅広い素材形状のCF基材に対して適用が可能。

②所定粒径のパウダーにできる樹脂であれば、各種の製造条件を調整することで適用が可能であり、樹脂選択の幅が広い。

③原料となる樹脂の製造形態がパウダー状であれば、ペレット化・フィルム化などの一次加工が不要となるため、樹脂の熱劣化抑制やセミプレグの製造コストの低減に有利。

④製造条件の変更により、CF基材への樹脂付着量（CFRTPに加工したときの炭素繊維含有量）を調整することが可能。

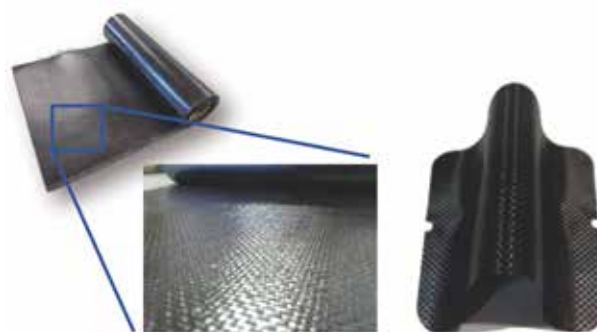



図3　高い柔軟性を有するセミプレグの外観

2.3　セミプレグから製造した CFRTP 平板の性能評価

開発した工法で製造したセミプレグへの期待性能として、セミプレグの表面に開口を有するため、セミプレグを加熱・加圧して CFRTP を製造する際に CF 基材中の空気が抜けやすく、①ボイド率の低い CFRTP が得られる、②機械的特性に優れた CFRTP が得られる、などが挙げられる。

そこで、2 種類の CF クロス基材とポリアミド 6（PA6）のパウダーとで製造したセミプレグを用いて、厚み 1mm の CFRTP 平板を成形した。

平板の断面を顕微鏡観察した結果、ボイドは確認されなかった。また、平板から試験片を切り出し、3 点式曲げ試験（JIS-K7074）を実施した。その結果の一例を図 4 に示す。開発したセミプレグは、従来のプリプレグと比較して、高い物性であった。

上記より、セミプレグを用いることで、低ボイド率で高強度な CFRTP を得られる可能性が示された。

さらに、セミプレグの高い柔軟性も含めたセミプレグの特長を最大限に引き出す賦形技術が、次章で紹介するダイレクト賦形技術である。

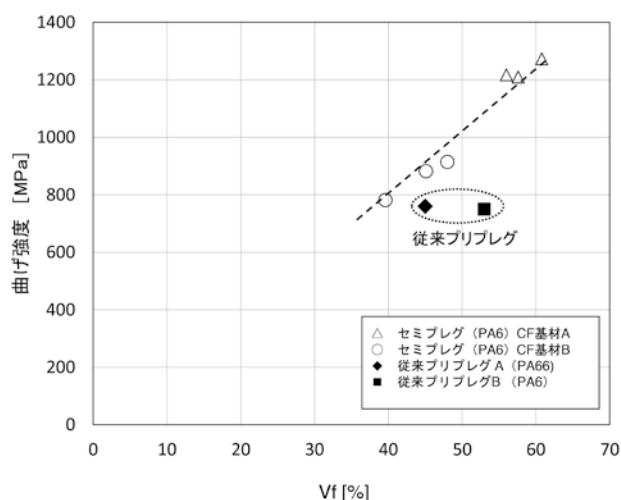



図4 セミプレグ成形品の Vf と曲げ強度の関係

3.　セミプレグのダイレクト賦形技術

3.1　ダイレクト賦形技術とその特長

CF 基材に熱可塑性樹脂をあらかじめ含浸させているプリプレグを用いる従来の賦形方法を図 5（a）に示す。この方法は、前述したようにフィルムスタッキング法などにより、樹脂と CF 基材とを重ねて加熱・加圧して製造したプリプレグを、一次賦形品が所定厚みになるように所定枚数積層した後、再度加熱・加圧してスタンパブルシートを製作する。さらに、そのスタンパブルシートを樹脂の軟化温度以上まで赤外線ヒータなどで再び加熱した後、樹脂が固化する温度に調整された金型に設置してプレス賦形し、樹脂が冷却・固化するのを待って金型を開き、一時賦形品を取り出す。

これに対して当社では、図 5（b）に示すような、セミプレグの特長を最大限に引き出すダイレクト賦形技術を開発した。

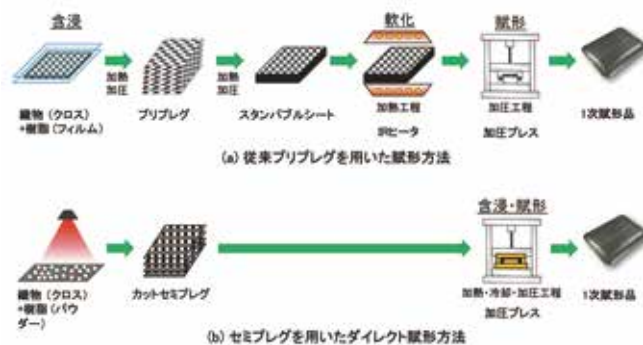



図 5　炭素繊維基材の賦形方法

従来のプリプレグは、樹脂が CF 基材にほぼ完全に含浸しているため、加熱せずに（軟化させずに）金型に投入して三次元形状を賦形しようとすると、プリプレグが破断する。これに対し、高い柔軟性を有するセミプレグを用いるダイレクト賦形技術では、図 6 に示すように、セミプレグを一次賦形品の形状に切断して、一次賦形品が所望の厚みになるように複数枚積層し、セミプレグの予備加熱なしで、後述する Heat&Cool 金型に直接投入する。その後、金型内で樹脂の溶融温度以上まで加熱し、積層したセミプレグを加圧することで樹脂を CF 基材の内部まで完全に含浸させる。さらに、冷却して樹脂を固化させ、一次賦形品としての所望の形状に固定する。

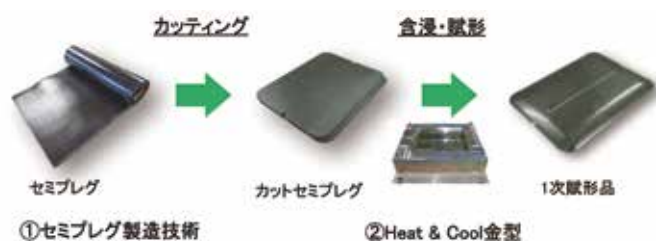



図 6　ダイレクト賦形技術の概要

このダイレクト賦形技術の特長を以下にまとめる。

①開発したセミプレグ製造方法で製造したセミプレグは柔軟性が高く、形状追従性に優れるため、予備加熱なしで金型に投入できる。

②樹脂の含浸と賦形とを同時に行うことにより、従来の賦形方法に比べて、CF 基材から一次賦形品を得るまでの加熱回数を削減することができる。これにより、樹脂の熱劣化を抑制できるため、機械的特性が高い一次賦形品が得られる。

③樹脂の含浸と賦形とを同時に行うため、工程が簡略化され、投入エネルギーも抑えられる。これにより、製造時の環境負荷が低くなる。

3.2 ダイレクト賦形技術の性能評価

セミプレグを利用する本工法への期待性能は、セミプレグの柔軟性を活かした高い形状賦形性の実現である。そこで、ダイレクト賦形技術を用いて四隅角部の曲率が異なる箱型成形品を成形して、性能を評価した。

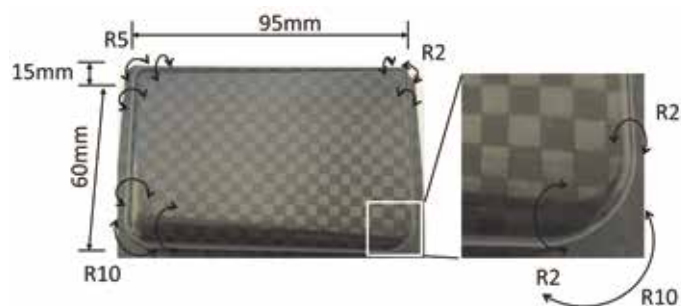
セミプレグは、PA6 を用い、Vf が 60％になるように樹脂の付着量を調整して製造した。このセミプレグを用いて成形した一次賦形品の形状概要と外観を図 7 に示す。最も曲率の小さい角部は、天面・側面ともに R2、最も曲率が大きい角度は R10 である。箱の深さは 15mm とした。

図 7 から明らかなように、セミプレグを箱型の三次元形状に良好に賦形できており、高い形状賦形性を有することが確認できた。成形条件によっては、R2 の角部で樹脂が不足して完全に含浸できない状態が散見されたが、その他の部分では、樹脂不足は観察されず、良好な外観を示した。また、垂直面や角部においても、顕著な繊維配列の乱れやしわも発生せず、概ね良好な状態であり、本工法により高い意匠性を実現できることを確認した。

図 7　一次賦形品の形状概要と外観

4. Heat & Cool 金型

4.1 Heat&Cool 金型の概要

図 5 に示した炭素繊維基材の賦形方法のプレス工程に着目すると、図 5 (a) の従来の賦形方法では、赤外線ヒータなどの外部加熱手段で、プリプレグを樹脂の溶融温度以上に加熱した後、樹脂が固化する温度に維持された金型に設置してプレスする。この方法は、短時間で賦形が可能であるが、金型に接触した樹脂は直ちに冷却されるため、鏡面加工された金型表面形状の転写性に劣り一次賦形品表面の肌が荒れたり、繊維の流動跡が残るなど、意匠性が低い。

これに対し、図 5 (b) のセミプレグのダイレクト賦形方法では、金型を樹脂の溶融温度以上まで加熱し、加圧賦形後に冷却する Heat&Cool 法を採用している。これにより、転写性に優れ意匠性が高いだけでなく[(2)]、三次元形状の賦形性にも優れ、ダイレクト賦形技術の特長の発現に重要な役割を担っている。

一方、Heat&Cool 法は、金型の加熱・冷却のために成形サイクルが長くなる課題がある。そこで当社では、この課題を解決するために、熱伝導率の高い銅合金である当社製のコルソン合金を用いた金型を開発した。

図 8 に Heat&Cool 用金型の外観を示す。ヒータおよび冷却水配管を、熱伝導性が 150W/m/K のコルソン合金[(3)]のブロック内に配置して、加熱・冷却時の温度変化を迅速に金型表面（キャビティ面）に伝播させると同時に、均一な温度分布の実現を狙った。一方、CFRTP に接触するキャビティ面には、高い耐摩耗性、鏡面仕上げ性が求められるため、硬度が HRC40 クラスの当社製プラスチック成形金型用鋼 UPD2（AISI P21 系の析出硬化系鋼）[(4)]を使用した 。本金型は、これら二種類の異なる金属材料を接合して複合化することで、高硬度と高熱伝導性とを両立した。

図 8　Heat & Cool 用金型の外観

4.2 Heat&Cool 金型の伝熱性能の検証

Heat&Cool 金型の伝熱性能を検証するため、赤外線サーモグラフィを用いて、加熱時および冷却時の金型表面の温度分布を測定した。加熱はコルソン合金部に挿入されたカートリッジヒータ、冷却はコルソン合金部に加工された冷却配管に水を通水することで行った。

図 9 に加熱時、図 10 に冷却時の金型表面の温度変化を示す。

一般に、カートリッジヒータによる金型加熱では、ヒータに近い部位の温度が先に上昇するため、キャビティ面に

ヒータの設置場所に沿った温度ムラが発生する場合がある。しかし、図 9 から明らかなように、本金型ではヒータの設置場所に起因する表面の温度ムラはなく、さらに金型表面の中心部と端部とで大きな温度差がなく、均一な表面温度分布を実現していることが確認できた。

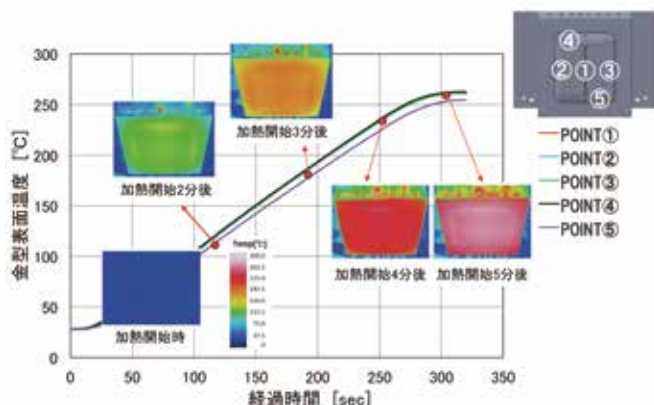



図 9　Heat & Cool 金型の加熱時の表面温度の変化

図 10 に示すように、260℃から 100℃以下までの冷却時においても、キャビティ面の中心部と端部とでの温度差は最大 9.2℃に収まり、面内の温度を均一に保ったまま冷却できる性能を有することが確認できた。これは、一次賦形品のソリの抑制にも寄与する。さらに、熱伝導率が高いコルソン合金を使用したことで、冷却配管からキャビティ面までの温度の伝播速度が速くなるため、キャビティ面の冷却速度が、従来の鋼で製作した金型に比べて約三倍になった。

今後、冷却水温度や流量、金型形状（厚みなど）の見直しにより、さらなる冷却時間の短縮を図る。

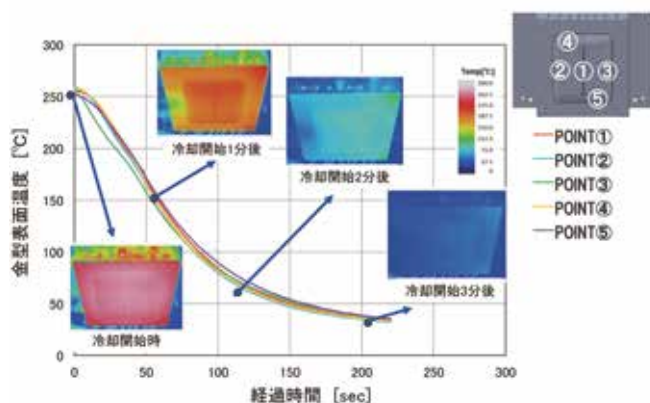



図 10　Heat & Cool 金型の冷却時の表面温度の変化

4.3　Heat&Cool 金型を用いて成形した一次賦形品の成形品品質の検証

セミプレグを図 8 の Heat&Cool 用複合金型で賦形した一次賦形品の外観、およびその賦形品の平坦部から切り出した試験片の断面写真、および機械的特性（曲げ強度および曲げ弾性率）の測定結果を図 11 に示す。セミプレグが持つ柔軟性により、金型内での繊維の流動が抑えられるため、エッジ部やコーナー部では、繊維の乱れがない一次賦形品が得られ、ソリの発生も抑えることができた。さらに、ボイド率を極めて低くすることができたため、良好な機械的特性が得られ、曲げ試験を行った結果、Vf が 56％のときに、曲げ強度、曲げ弾性率はそれぞれ 1217MPa、67GPa であった。

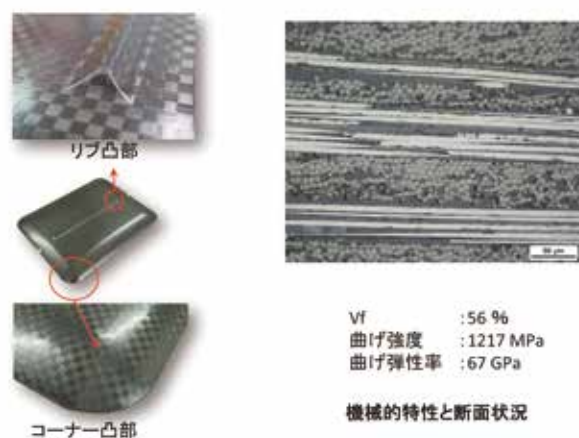



図 11　セミプレグを使った一次賦形品の外観と機械的特性

5.　CFRTP 複合成形システム

これまで紹介してきたダイレクト賦形技術は、セミプレグから一次賦形品を製造するものである。製造された一次賦形品は、さらにボスやリブなどを二次成形して、最終的な CFRTP 成形品として用いられるのが一般的である。一次賦形品にボスやリブを成形する場合、CFRTP 成形品のソリや曲がりなどの成形不良を防ぐため、成形方法だけではなく、ボスやリブを構成する不連続 CF 繊維を含む樹脂材料の検討も必要となる。特に、連続繊維で構成された一次賦形品に不連続繊維を接合するには、接着性の問題や、不連続繊維の配向による外観の低下を解決する必要がある。

そこで当社では、不連続繊維の樹脂との配合比の調整や、成形条件の最適化により、CFRTP 成形品を効率よく成形できるハイブリッド成形技術の開発を行っている。

さらにこのハイブリッド成形技術とダイレクト賦形技術とを融合し、図 12 に示すように、セミプレグの製造から最終の CFRTP 成形までを一貫して行う CFRTP 複合成形システムの開発も進めている。

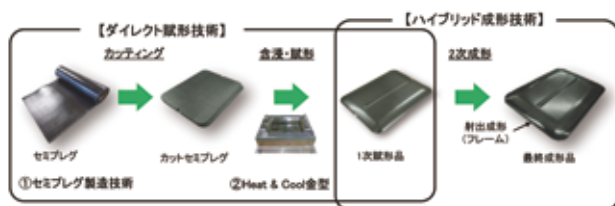



図 12　CFRTP 複合成形システム

図 13 に、CFRTP 複合成形システムを用いた成形品の一例を示す。ダイレクト賦形技術により、セミプレグを一次賦形品に賦形した後、フレームとリブを、不連続短繊維を含有した樹脂で射出成形したものである。短繊維を用いたリブ表面は不連続繊維特有の柚子肌も発生せず、連続繊維で構成された一次賦形品と密着していることを確認した。

さらに今後は、当社独自の DSI 成形技術(5) などを組み合わせた CFRTP 複合成形システムの開発も進める予定である。

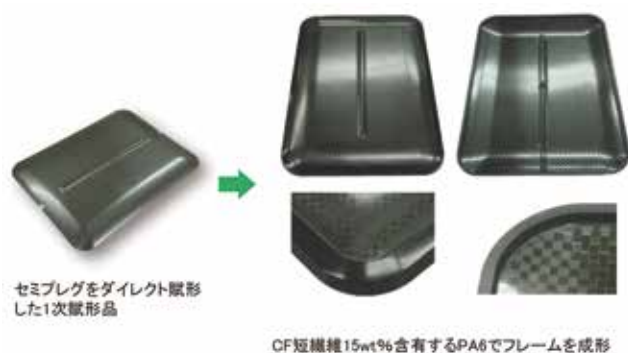



図 13　CFRTP 複合成形システムによる成形事例

6. 結　　言

CFRTP は、用途に応じて様々な CF 基材の形態、樹脂材料、成形加工方法が用いられる。よって、お客様の要望に応えるには、CF 基材から最終成形品までの幅広い成形システムを提案できる技術開発が必要となる。

本報では、CFRTP 関連技術として、含浸性を改善した高性能 CFRTP 基材であるセミプレグの製造方法、セミプレグ柔軟性を活かしたダイレクト賦形技術、一次賦形品を最終的な CFRTP 成形品に加工するハイブリッド成形技術、およびそれらを一貫して行う複合成形システムについての技術を紹介した。さらに、これらの技術の融合により、従来に比べて高い機械的強度と優れた意匠性を持つ CFRTP 成形品の成形が実現できる可能性を示した。

今後も、CFRTP 成形に関わる技術開発を進め、お客様のニーズに応えられる技術と成形加工システムを提供していく所存である。

参　考　文　献

(1) 社団法人日本機械工業連合会／財団法人次世代金属・複合材料研究開発協会：”熱可塑性樹脂複合材料の機械工業分野への適用に関する調査報告書”、(2008)

(2) 和田明紘：“射出成形品の外観に関する研究”、成形加工、Vol.2、No.3 (1991)、p.165

(3) 宮部芳春、水澤護、田中慎二：”高強度銅合金鍛造材”、特許公告、WO2012111674 A1

(4) 知念響、間島哲司、橋邦彦、高橋達也：“高鏡面・耐錆性プラスチック金型用 P21 改良鋼における NiAl の析出制御による高靱性化”、日本製鋼所技報、No65 (2014)、p.30-35.

(5) 西田正三：“型内組立による射出成形品の高付加価値化”、成形加工、Vol.13、No.5 (2001)、p.298-305.

固体レーザアニール装置の技術開発と将来展望

Development of Solid State Laser Annealing Systems and the Future Perspective

小林　直之
Naoyuki Kobayashi

草間　秀晃
Hideaki Kusama

要　　旨

LTPS（Low Temperature Polycrystalline Silicon）の製造工程にあるa-Si（amorphous silicon）薄膜の結晶化には、エキシマレーザを使ったELA（Excimer Laser Annealing）装置が使われているが、エキシマレーザは特殊なガスを使ったガスレーザで、状態を一定に保つことが難しく、維持費が高いため、安価なレーザである固体レーザを使いたいとの要望が高い。そのため、ELA装置に代わる装置として、固体レーザアニール装置が開発されているが、未だ、製造工程に使われた実績はない。その理由は、レーザで作製される結晶の形状は、レーザの波長、パルス幅、ビーム形状に依存し、固体レーザは、エキシマレーザの均一粒径のp-Si薄膜の結晶を作製できていないためである。本報告では、固体レーザでa-Si薄膜を結晶化する際の現状と課題を述べ、固体レーザによるLTPSに適したa-Si薄膜の結晶化の可能性について述べる。

── Synopsis ──

The excimer laser annealing (ELA) system has been widely used for the crystallization of amorphous silicon (a-Si) on the manufacture of low temperature polycrystalline silicon (LTPS). Excimer laser, which uses special halogen gases, requires skills to stabilize the operating conditions and high maintenance cost. Therefore, more economical solid state laser is desired for excimer laser. Although the solid state laser system is developed for the a-Si crystallization, it has not been adopted for the actual manufacture of LTPS. Since the polycrystalline silicon (p-Si) structure produced by the a-Si crystallization process depends on the laser wavelength, the laser pulse width and the spatial beam profile, solid state laser can hardly provide the annealed p-Si grains with as good uniformity as those made by excimer laser. This is the reason why solid state laser is not used for the ELA system. This report describes the current situation and problems of the a-Si crystallization by solid state laser and foresees the possibility of creating an appropriate polycrystalline structure for LTPS by solid state laser.

1. 緒　　言

レーザアニールは、特定の波長の光をマイクロ秒以下の短い時間で熱処理することができるため、薄膜等の極表層の改質に適している。ガラス基板上の薄膜（40 ～ 60nm）シリコンや、シリコンウエハの表層0.1 ～ 1μmのみを、ガラスや予め形成された回路へ影響を与えることなく、シリコンの融点近傍まで高温にするには、レーザアニールが不可欠である。

当社は、1995年にLTPS（Low Temperature Polycrystalline Silicon）製造用のエキシマレーザアニール（ELA）装置を世界で初めて出荷し、以来、100台を超える装置をディスプレイメーカへ納入してきた[(1)]。LTPS用のELA装置に加えて、CMOSセンサやパワーデバイス製造のためのシリコンウエハのアニール用[(2)(3)]に、固体LA装置も製造・販売している。

固体LA装置は、エキシマレーザと比較して取扱いやメン

横浜研究所
Yokohama Research Laboratory

テナンス性の良さから、アニール深さ0.1μm以上の半導体ウエハのアニールに適し、製造ラインへの採用実績があるが、50nmのa-Si薄膜をアニールする必要があるLTPSの製造に使われた実績はない。固体LA装置では、ELA装置で作製する規則性のある結晶粒を作製できていないことが一因である。

一方、固体レーザはエキシマレーザにない優れた特長があるので、結晶化方法を工夫することで固体LA装置がLTPSの製造に使われる可能性はある。そこで本報告では、緑色の固体LA装置でa-Si薄膜を結晶化する際の現状と課題を述べ、今後の展開を探る。

2. レーザアニールによる結晶化

2-1 結晶化の分類[4]

レーザをガラス基板上の薄膜シリコンに照射すると、薄膜シリコンは表層部から光吸収し、光強度が高いとシリコン膜は溶融する。光吸収量は表層ほど多く、ガラス側から熱拡散するため、表層の温度が高く、ガラス界面の温度は低い。結晶化の形態はシリコン膜の到達温度によって異なり、固液界面が膜内にできる場合を部分溶融結晶化、ガラス界面に溶融しない結晶核が点在する場合を準完全溶融結晶化、シリコン膜全体が溶融して結晶化する場合を完全溶融結晶化と呼ぶ。図1に各結晶化の模式図を示す。

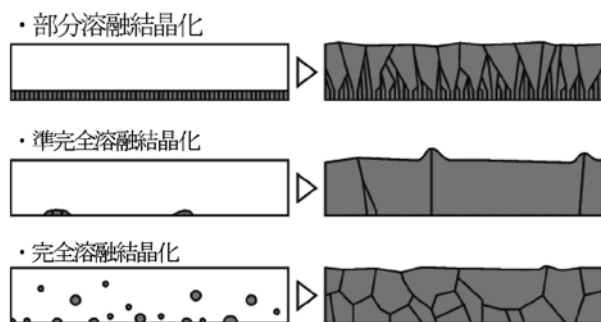



図1　結晶化の分類

2-2 オーバーラップによる多数回照射

ELA装置で採用しているラインビーム方式による結晶化は、図2のようにラインビーム形状のレーザビームを重ね合わせながらスキャンすることで全面を結晶化する方法である[1]。重ね合わせ量は、オーバラップ率＝（ビーム幅－送りピッチ）／ビーム幅で定義され、通常オーバラップ率は90～95%で、一か所あたり10～20回レーザを照射する。照射回数と共に結晶粒は成長し、おおよそ10～20回の照射で結晶はほとんど成長しなくなり飽和する。このようにして作成される結晶は図3に示すように、粒の大きさは照射する波長にほぼ一致し、その大きさは規則構造を持っている。

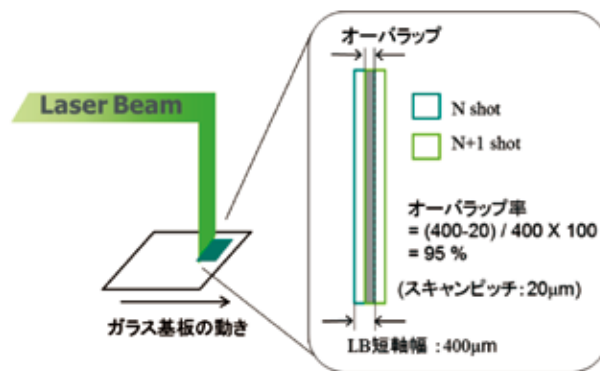



図2　オーバラップ照射

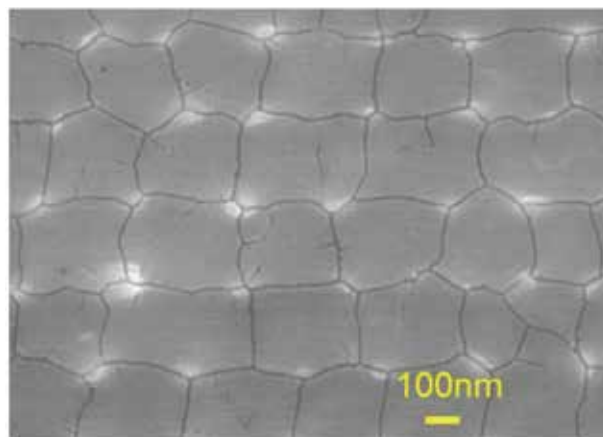



図3　ELA装置で結晶化したp-Si結晶

この結晶化は、ガラス界面に溶融しない結晶核を起点に固化する[5]と考えられているが、そのような結晶核が均一に残存する条件は狭いであろうこと、オーバラップ照射では、多数回の照射により結晶粒が大きくなることから、固相成長による結晶成長とするのが妥当と思われる。レーザ照射すると表面のみが溶融し、ガラス界面に近い部分は複数回のレーザ照射により固相成長して、固相成長した結晶核から溶融したシリコンがエピタキシャル成長すると考えられる。この結晶化は、ガラス界面に固相が残るが、結晶核は界面に近い側にあるので、図1に示す部分溶融結晶化と準完全溶融結晶化の中間にあると考えられる。

レーザ照射すると、表面に周期的なリップルが現れるメカニズムには光干渉説や、SPP（surface plasmon polariton）説等[6]がある。SPPは真空や空気から、凹凸な表面へP波が入射すると発生し、誘電率が負の値となると発生する[7]。薄膜Siへレーザを照射する場合は、①1回目のレーザが照射して溶融凝固すると表面突起が発生すること、②Siは溶融することで電子密度が増えて誘電率が負の値をとること、③光学系を通したビームは偏りがありP波成分が存在することからSPP条件を満たしている。溶融したSiはSPPによる温度分布を持つため、固液界面下にある固体Siがその温度分布により複数回の照射によって波

長の大きさの結晶へ固相成長すると考えられる。一方、溶融したSiは表面突起が消滅する可能性があることなど矛盾もあり、結晶粒が均一になるメカニズムは矛盾なく説明できているとは言い難い。

2-3　SLS 法

完全溶融結晶化は、レーザ照射領域の境界にある種結晶を起点に薄膜シリコンを横方向に成長させることができる。当社はこの現象を利用したSLS（Sequential Lateral Solidification）装置を製造・販売した[4]。図4にSLS法の模式図を示す。エキシマレーザを使ったSLS法は、ラインビーム法に比べて大きな結晶を作ることができる利点があるが、マスクの開口率は50％のため、レーザ光の透過率が低くレーザ出力の損失が大きいという課題がある。そこで線幅の狭いラインビームを使えば、エキシマレーザを使ったSLS法と比べてレーザの利用効率を上げることができる。また、結晶成長の終点となる位置に発生する突起に再照射するSLS-directional法を採用できるので、表面粗さの小さい、大きな結晶を作ることができる。

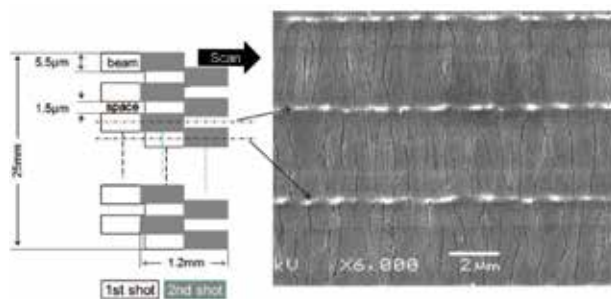



図4　SLS法

後述するが、エキシマレーザと比較して、固体レーザは集光性に優れ、繰返し周波数が高いという利点がある。そのため固体レーザは線幅の狭いラインビームを作ることができ、SLS-directional法に適している。

3.　薄膜シリコンの結晶化と光源

3-1　波長の影響

表1に、広く普及しているレーザ発振器の波長、308nm，355nm，532nmの、アモルファス・シリコン（a-Si）と結晶シリコン（c-Si）の浸透深さ（光が87％吸収される深さ）と波長の関係を示す[8]。表1に示すように、波長が短いほど浸透深さは小さい。薄膜Siの膜厚が30～50nmであることから、固体レーザでも355nm，532nmを採用すれば、薄膜がa-Siであればレーザを吸収するのでa-Siは溶融温度に達し、結晶化が可能である。但し、厚さ50nmの単結晶Si（c-Si）は波長532nmを7％しか吸収しない。

表1　浸透深さ

波長	a-Si	c-Si
308nm	8nm	6.7nm
355nm	10.1nm	9.4nm
532nm	42.3nm	683nm

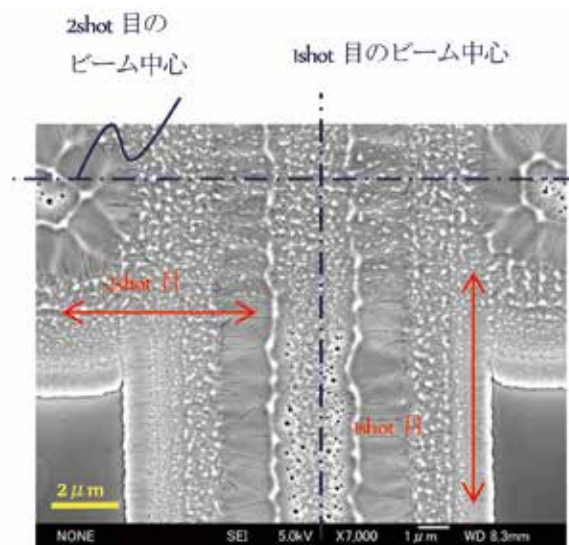
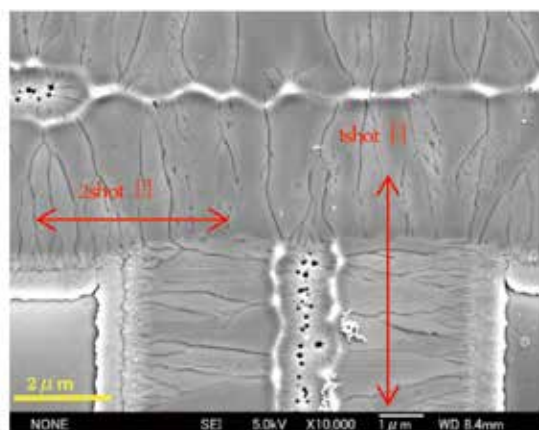
前述のように、ELA装置によるラインビーム結晶化は、多数回のレーザ照射により均一な結晶粒を形成する方法で、これはガラス界面の結晶が溶融することなく固相成長してできる結晶化であると説明した。そのためには、①膜厚方向の温度差を大きくするため、熱拡散を考慮すると吸収深さは10nm以下が望ましく、②多数回照射のためa-Siとc-Siの浸透深さが同程度であることが必要条件と考えられる。エキシマレーザの308nm、固体レーザの3倍波である355nmは、これらの条件を満たしているが、固体レーザの2倍波波長532nmは、いずれの条件も満たしていない。特に、a-Siとc-Siの浸透深さが1桁違うため、最初のレーザ照射でa-Siからc-Siに相転移した薄膜Siの光吸収率は低く、次のパルス以降では結晶化温度に達しない可能性がある。そこで、1shotでレーザ照射し、同じ条件で最初の照射域に直交する方向へ重ねて照射して、2shot目のレーザが薄膜Siを再結晶化するか確認した（クロス照射）。図5にクロス照射したときの薄膜SiのセコエッチングSEM写真を示す。図5で縦方向が1shot目、横方向が2shot目である。照射したレーザのビーム形状は、短軸方向はガウシアン形状で、ビーム中心のエネルギーは高い。

（a）準完全溶融域

図5　クロス照射

図中の矢印はラインビームの長軸方向を示す。

図5aの準溶融領域では、クロス照射された領域には、1shot目で作られた結晶がほぼ残存した。但し、2shot目のビーム中心では突起（白い輝点）が増え、再溶融している様子が見られた。この結果は、波長532nmではa-Siとc-Siの浸透深さは1桁違っていることから妥当な結果である。図5bの完全溶融域では、クロス照射された領域では2shot目のレーザが、1shot目の結晶を種結晶として横方向へ成長した。2shot目の作る結晶の起点がビーム中心側に移動していることから、2shot目で吸収されたレーザエネルギーは小さくはなっているが、再結晶化していることがわかる。

図5の結果より、完全溶融する条件であれば2倍波の固体レーザで薄膜Siを結晶化できることがわかった。

4.　固体レーザによる結晶化

固体レーザは基本波の1030～1065nmの光を、波長変換素子を使って、2倍波の515～532nm、3倍波の343～355nmの光を発することができる。波長変換するとレーザ出力は小さくなる。表2にレーザ波長と市場に普及しているレーザの最大出力との関係を示す。表2の装置価格はレーザ出力あたりの価格で、エキシマレーザを1としたときの相対値である。エキシマレーザはCl混合ガスを使用するため、ガス設備の価格を含めている。表2より532nmの固体レーザはエキシマレーザとほぼ同額である。また、エキシマレーザは数日毎に定期的なガス交換を必要とするためメンテナンス性に難があるが固体レーザはその必要がない。

エキシマレーザのメンテナンス性を考慮すると、532nmの固体レーザはエキシマレーザと比べて魅力がある。そこで、生産機として採用される可能性があるグリーンレーザを結晶化装置として検討対象とした。

表2　レーザ波長と出力

波長	308nm	532nm	355nm
媒質	XeCl	2ωYAG	3ωYAG
出力	1200W	200W	100W
価格　円／W（相対値）	1	1	3

4-1　固体レーザの特長

固体レーザ（532nm）の特長は、

①浸透深さが大きい
②パルス幅が長い
③直線偏光
④集光性が良い
⑤高い繰返し周波数

である。これらの特長を生かせる方式は、2-3項のSLS-Directional法である。SLS-directional法は、結晶成長長さよりも短い送りピッチでビームを重ねて照射し、先に結晶化した結晶を種として成長させることで大粒径の結晶を作る方法である。そのためには、ビームの線幅は結晶成長長さの2倍程度が望ましい。図5より、結晶成長長さは2～3μmであるので、ビームの線幅は4～6μmにする必要がある。このような線幅にできるレーザ発振器は集光性の良い固体レーザである。また、線幅の短いビームを送りピッチ2μm以下で高速にスキャンするためには繰返し周波数が高い固体レーザが適している。

4-2　SLS-directional 法の結晶性

そこでSLS-directional法で薄膜シリコンの結晶化を行い、結晶性をSEM（Scanning Electron Microscope）とEBSD（Electron Back Scatter Diffraction）で評価した。その結果を図6，7に示す。

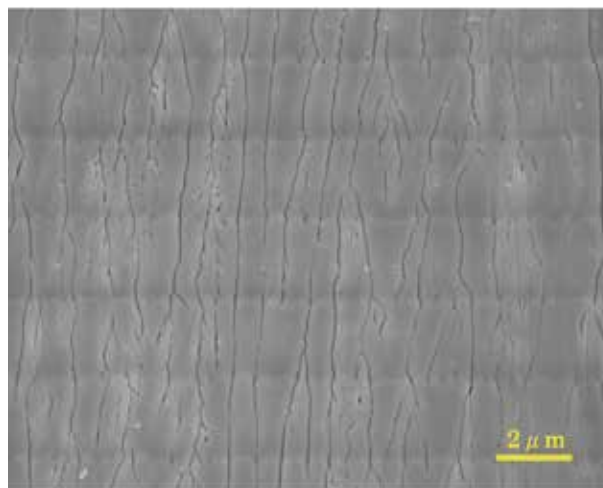



図6　SLS-directional法で作成したp-Si膜のSEM像

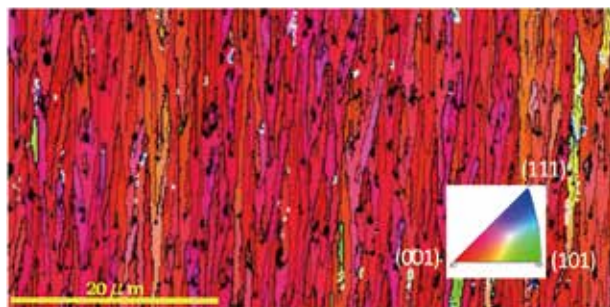



図7　SLS-directional 法で作成した p-Si 膜の EBSD 像

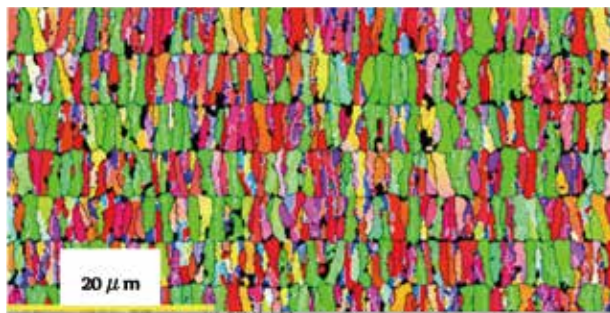



図8　SLS 法で作成した p-Si 膜の EBSD 像

SLS-directional の結晶方位は (001) に配向した。参考に、結晶を連続して成長させない SLS-2shot 法で作成した結晶の EBSD を図８に示す。固体レーザで作る SLS-2shot 法は、SLS-directional 法が結晶成長の終点に発生するリッジ上にビームを照射するのに対し、送りピッチを広げることで、リッジを残しながら照射する方法である。そのため結晶はビーム端を種として成長する。この方法で作成した結晶は特定の方位に配向しなかった。図７、８より、SLS-directional 法では (001) 配向することがわかる。

このように、SLS-directional 法の結晶は、大粒径で方位の揃った結晶ができ、また結晶成長の終端に発生する突起がほとんどなく、平坦度は高低差で２～3μm である。実際に、この結晶を使って TFT にして電気特性を評価すると、移動度で 250cm^2／V と ELA 結晶の TFT に比べて約２倍の特性が得られた。しかし、移動度のばらつきは ELA と比べて大きかった。これは、固体 LA 結晶は最大の移動度は大きくなるものの小さい結晶粒が混在し、その移動度は ELA 結晶の最小移動度と同等のためである。そのため、ディスプレイにすると応答のばらつきが見られるため表示ムラが良くなく、ディスプレイメーカの製造ラインに採用されてはいない。

4-3　部分溶融法で作る結晶

固体レーザはエキシマレーザと比べてメンテナンス性の良さから、ELA と同等の結晶を作製できれば装置としての魅力がある。そこで、ELA と同様に準完全溶融域で結晶化を試みた。但し、前述の通り、532nm の固体レーザは、a-Si と c-Si の浸透深さの違いから多数回照射に向かない懸念がある。

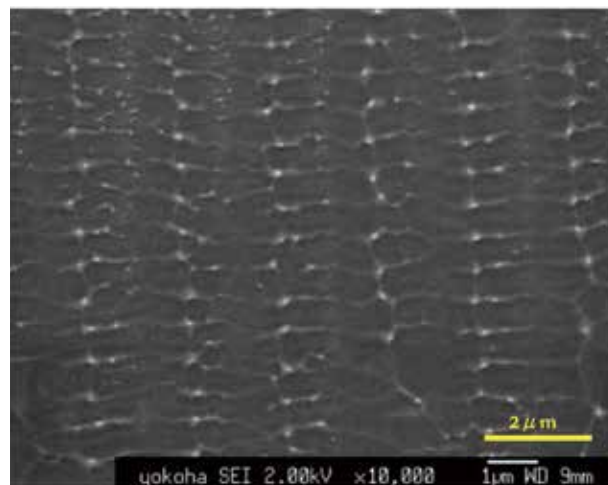
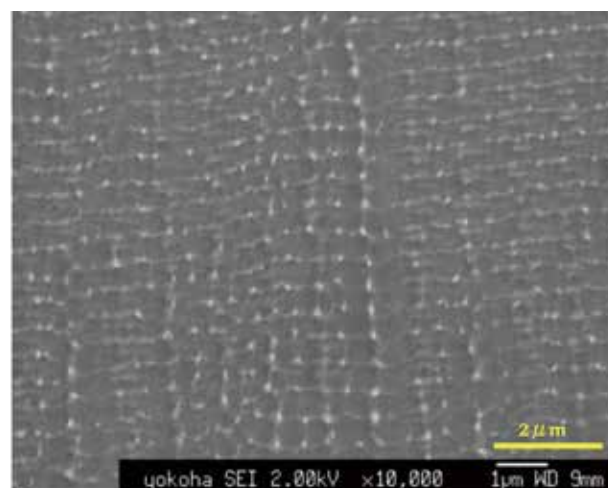
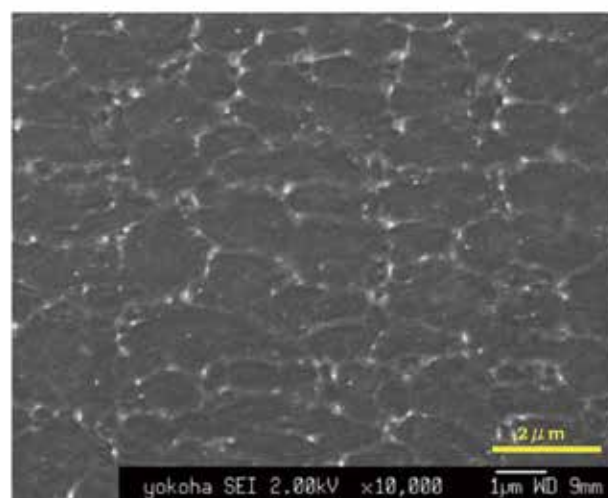
図９に送りピッチを 2μm，1μm，0.5μm と変えて作製した結晶の SEM 写真を示す。

（a）送りピッチ：2μm

（b）送りピッチ：1μm

（c）送りピッチ：0.5μm

図９　固体レーザで作る部分溶融結晶

照射したビームは長軸がトップフラット形状、短軸が半値幅で6μmのガウシアン形状で、短軸方向（紙面の横方向）に平行にスキャンした。

図9aより結晶成長の端部に発生するリッジの間隔は、スキャン方向は2μm、長軸方向は0.5μmであった。リッジは結晶成長の終端に発生するので、リッジ間隔は結晶の大きさとみなして良い。スキャン方向のリッジ間隔は送りピッチにほぼ一致している。これは、ガウシアン形状のビームを照射すると、ビームの尖頭値周辺の±1μmのみが溶融すると考えると説明がつく。長軸方向のリッジ間隔はレーザ波長の大きさにほぼ一致している。前述の通り、レーザを薄膜Siに照射して溶融するとSPPが発生すると考えられ、結晶成長はSPPによる温度分布に合わせて結晶成長したと思われる。エキシマレーザでは1shotで波長周期の規則配列は見られなかったが、固体レーザでは少ない照射回数で規則配列が発生した。図9は非溶融部分を含めると1shotでないため、1shot照射した結果を図10に示す。図10より、長軸に平行な時にリッジ間隔に規則配列が見られ、固体レーザは1shotでの規則配列が出現することを確認した。レーザ照射により1shotで表面凹凸に規則性が見られる現象は数多くの報告(9)があり、これは良く知られた現象である。

固体レーザはエキシマレーザと比べてSiへの浸透深さが深く、Si／ガラス界面の低温部分から固化し、前述のELAのオーバラップ照射のように固相成長領域はないことが、固体LA結晶は1回の照射で規則構造が発生する要因と考えられるが、詳しいメカニズムは不明である。

次に、送りピッチが1μmの時の結晶形状（図9b）を見ると、送りピッチ2μmの結晶（図9a）のリッジに追加してリッジが増えているように見える。前述の通り、波長532nmでは、a-Siとc-Siの溶融深さに大きな違いがあるため、2shot目のビームでは結晶化するほど温度が上昇しない。おそらく1shotでは結晶成長が不十分な領域がリッジ間隔の中央（1shot目で結晶の起点になるため低温の部分）に残り、この領域が2shot目で溶融して結晶化したと思われる。

さらに、送りピッチが0.5μm（ビームサイズを6μmとすると照射回数は12回）の結晶形状（図9c）を見ると、送りピッチ1～2μmの結晶と大きく違っている。照射回数が初期の段階での結晶は図9a、bの結晶であるはずだが、照射を重ねると初期の段階でできた結晶は再溶融して上書きされているように見える。a-Siとc-Siの浸透深さの違いから結晶化したSiは再溶融されないと思えるが、実際は照射回数を重ねると再溶融しているようである。レーザの繰返し周波数が高いため基板の温度が上昇していることが影響している可能性がある。筆者には図9cの結晶ができる理由はわからないが、532nmの固体レーザによる薄膜Siの結晶化は、ELAのように照射回数を重ねるとともに結晶形状が規則構造をもつようになることはなく、むしろ、1shotで規則構造が出現する結果であった。固体LA装置は少ない照射回数で規則構造の結晶を作製できることを期待させる。

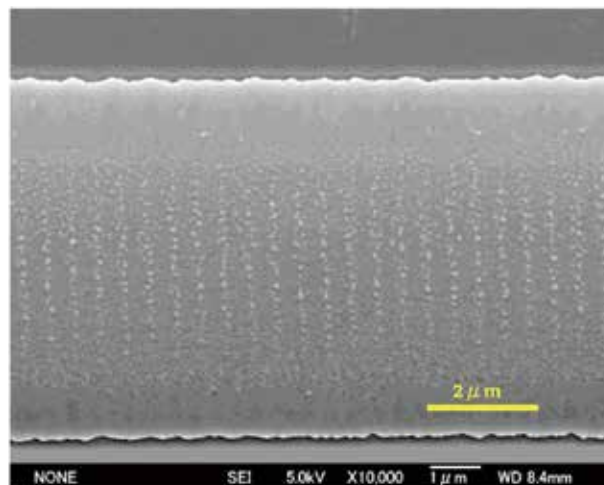



図10　1shot照射後のSEM像

5. 結　　言

LTPSの結晶化には当社のELA装置が広く普及し、ELA装置に代わる結晶化装置としての固体LA装置の可能性について言及した。固体LA装置の特長から、平坦で大粒径の結晶を作製できるSLS-directional法に着目したが、TFT特性は向上するもののバラつきが大きいことから、固体LA装置はLTPSの製造には使われていない。そこで、固体LA装置で、ELA装置と同様のオーバラップ照射でELAと同様の規則構造を持った結晶ができるか確認するため準溶融結晶化を試みたところ、規則構造を持ったリッジ間隔が見られた。これは多数回照射でなく、1shotの照射で見られた。この事実は、固体LA装置は1回の照射で規則構造を持った結晶を作製できることを示している。

当社は固体LA装置では半導体分野に適合した装置を製造・販売し、技術的な蓄積がある。今後、LTPSの製造ラインに適したプロセスを確立してELA装置を凌ぐ固体LA装置を提案したい。

参　考　文　献

1）船場、次田：日本製鋼所技報，No58 (2007)，p70
2）新井、光田、小林、工藤、佐野：日本製鋼所技報，No61 (2010)，p64
3）清野、山口、小林、工藤、佐野：日本製鋼所技報，No63 (2012)，p102
4）富樫、次田、A.B.Limanov, P.C.van der Wilt, J.S.Im, 日本製鋼所技報，No57 (2006)，p113
5）M.He,R.Ishihara,W.Metselaar and K.Beenaller : J.Appl. Phys.,vol100,083103,2006
6）Z.Guosheng, P.M.Fauchet, and A.E.Siegman ; Physical Review B, vol.26, No.10, 15November1982, 5366
7）J.Bense, A.Rosenfeld, and J.Kruger : J. Appl. Phys. 106, 104910 (2009)
8）E.Pedik : Handbook of optical constants of solid,
9）A.E.Siegman and P.H.Fauchet : IEEE Journal of quantum electronics, vol.QE-22, No.8, August 1986

固体ソース ECR プラズマ装置の電子デバイス向け保護膜への応用

Application of the Solid-Source ECR Plasma System to Barrier Thin Films for Electronic Devices

鳥居　博典
Hironori Torii

工博 嶋田　勝
Dr. Masaru Shimada

要　　旨

スマートフォンの高機能化と本体の小型化に伴い内部に搭載されている電子デバイスの高密度化が求められ、デバイスの保護方法も従来の金属や樹脂による方法から成膜プロセスを用いた薄膜による保護方法の採用が進んでいる。また、保護膜は大気中に含まれる水分からの保護だけではなく薬品に対する保護、摺動部分の保護など様々なデバイスで用いられることから、保護膜用途での成膜装置は今後も大きな需要が見込まれる。このような分野への展開を目的として JSW アフティ株式会社が独自技術で開発・販売している固体ソース ECR プラズマ成膜装置の SiN 膜、ZrO_2 膜および Ta_2O_5 膜の各種膜特性を評価したところ他の成膜方法にくらべ優れた特性を示す結果が得られた。

Synopsis

The increasing functionality and compactness of smartphones require higher package density of the electronic devices mounted inside them, which accelerates the adoption of protection methods using thin films instead of conventional metals or resins. Since barrier films are used in various electronic devices not only for the protection from moisture in the atmosphere but also for the protection from chemicals or from sliding wear, demands for the deposition system for barrier film formation are expected to increase from now on. For the purpose to expand the application of thin films deposited by the solid-source ECR (Electron Cyclotron Resonance) plasma system, which has been independently developed and sold by JSW-AFTY Corporation, to this field, the evaluation of the characteristics of silicon nitride films, zirconium oxide films and tantalum oxide films were carried out, and excellent properties of these films as the barrier film were observed in comparison with those deposited by other methods.

1. 緒　　言

スマートフォン本体の高機能化や薄型化に伴い内部の電子デバイスも小型化、高機能化が求められ、ウェハの状態でパッケージングまで行うウェハレベルチップサイズパッケージ(WL-CSP)と呼ばれる半導体パッケージ技術[1]が高周波フィルターの一つである SAW(表面弾性波)デバイスにも採用され始めた[2]。この場合、非常に保護特性の高い薄膜が必要になる。また、スマートフォン内部のデータ保存に関連した新しい技術としては、データをクラウドで外部ストレージに保存する方法が普及し始めており、データセンターで使用されているハードディスクの記録密度向上が求められている。記録密度向上のための技術として熱アシスト記録方式が提案されおり、やはり保護特性の優れた薄膜が必要になっている[3]。JSW アフティ社の ECR プラズマ成膜装置は高密度プラズマを活かした優れた膜質と、高均一化技術による高い膜厚均一性成膜を活かし半導体レーザー端面の誘電体膜コート、ハードディスクヘッドの絶縁膜などの無加熱で高品質な膜が求められる電子デバイスに採用されてきた。この技術を活かし前述に挙げたデバイスをはじめとして様々なデバイス用の保護膜形成装置に適応すべく成膜条件の最適化を行い、保護膜特性評価を実施した結果を報告する。

JSW アフティ株式会社
JSW AFTY Corporation

2. 固体ソースECRプラズマ成膜の原理

図1に示すように磁場Bを与えると、電子はローレンツ力を受けて磁力線の周りを回転運動する。このとき磁場の強さ87.5mTに対して2.45GHzのマイクロ波を加えると共鳴現象が起こりマイクロ波による交播電界により電子は加速される。高速に回転した電子はプロセスガスと衝突し、電子が放出されることで連続したプラズマが生成される。こうして生成されたプラズマをECR（Electron Cyclotron Resonance）プラズマという。真空チャンバ内に、磁界形成と交播電界としてのマイクロ波供給のみでプラズマが生成されるので、他のプラズマ源に比べると電極やプラズマ引出しグリッドなどを必要としないことから長寿命で且つ汚染が少ないプラズマを生成することができる。また一般的なプラズマに対し一桁以上低い0.1Pa以下の高真空状態で10mA/cm^2レベルの高密度プラズマを得ることができ、反応性成膜が容易となる

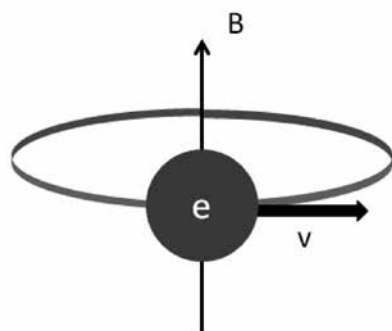



図1　ECRプラズマの生成原理

3. ECRプラズマと装置構成

固体ソースECRプラズマ成膜装置の基本構成を図2に、装置外観写真（AFTEX-9600）を図3に示す。基本的な装置構成は成膜室とECRプラズマチャンバーで構成され、成膜室に取り付けられたターボ分子ポンプで真空排気される。ECRプラズマの生成は成膜室にアルゴンガスを供給し、次にECRプラズマチャンバーに配置されたコイルによって発散磁場を生成させる。プラズマ中の電子は磁場勾配に沿って基板に移動し、イオンはその電子を追うように基板側に引き出されプラズマ流が形成される。このときの基板とプラズマチャンバー間のポテンシャル差は20～30V程度であり非常にエネルギーの低いプラズマ流となる。

ECRプラズマチャンバー出口には円筒型ターゲットが配置されており、ターゲットにRF電力を印加するとターゲットには負のセルフバイアスが発生しプラズマ中のイオンがターゲットに加速されスパッタリングされる。

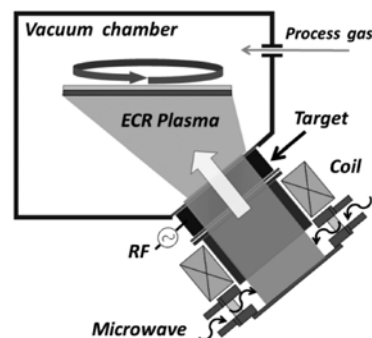



図2　装置説明

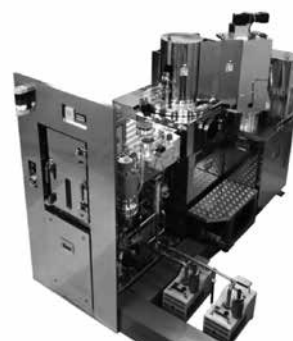



図3　AFTEX-9600

また、円筒ターゲットにRF電力を投入しなければECRプラズマのみ基板に照射することが可能で、成膜前に基板表面に付着した水分などを除去することができる。さらにArの代わりに酸素を導入すれば基板の酸化、窒素を導入することで窒化も可能であり、これらの処理は半導体レーザーの端面コート成膜の必須技術とされている。

高い膜厚均一性を得るためにECRプラズマチャンバーを傾斜配置させ、基板ホルダに基板回転機構と基板-ターゲット間距離を調整する機構（図2）を持つ。

AFTEX-9600（図3）で成膜したSiNの膜厚−屈折率均一性を図4に示す。6インチ面内で±3%以下、4インチ面内では±1%以下と非常に優れた膜厚均一性が得られている。また、屈折率均一性も±0.1%以下を実現しており面内で均一な膜質が形成されていることが分かる。

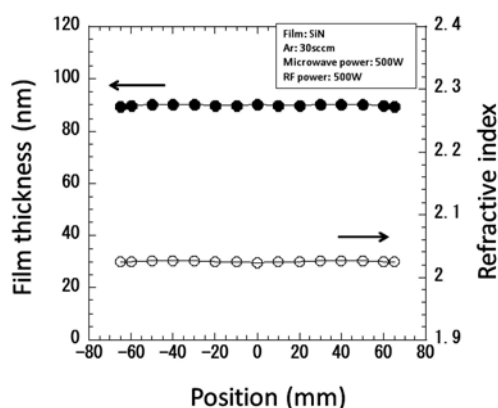



図4　SiN膜の膜厚分布と屈折率分布

長時間運用技術の一つとしてマイクロ波の供給を一度分岐させた後、ECR プラズマチャンバー下部で結合導入する構造を採用している。マイクロ波導入用石英窓をターゲットの位置から死角に配置でき、成膜時にターゲットからスパッタされた材料がマイクロ波導入窓へ付着することを大幅に低減できる。これにより長時間の運用でもマイクロ波の減衰が抑制され、24 時間の稼働が可能となっている(4)。

4. 固体ソース ECR プラズマ成膜の膜特性

固体ソース ECR プラズマ成膜法は高密度プラズマの反応性を利用することにより、各種ターゲット材料とプロセスガスを組み合わせることで多種多様な膜種を形成することが可能である。プロセスガスに $Ar+O_2$ を導入すれば酸化物が形成でき、$Ar+N_2$ を導入すれば SiN、AlN などの窒化膜が、$Ar+N_2+O_2$ の導入で AlON、SiON のような屈折率制御可能な酸窒化膜が形成できる。

固体ソース ECR プラズマ成膜装置で主に使用されている膜種とその用途の一例を表 1 に示す。

表 1　膜種と用途

膜種	薄膜	ターゲット	用途
酸化膜	Al_2O_3	Al	光学膜　絶縁膜
	SiO_2	Si	光学膜　絶縁膜
	ZrO_2	Zr	光学膜
	HfO_2	Hf	ゲート絶縁膜　電極
窒化膜	AlN	Al	光学膜
	SiN	Si	光学膜　保護膜
	ZrON	Zr	ゲート絶縁膜
	HfON	Hf	ゲート絶縁膜
酸窒化膜	AlON	Al	光学膜　屈折率制御用途
	SiON	Si	屈折率制御用途
透明導電膜	ITO	ITO	透明電極

ECR プラズマ法の優位性を確認するために表 1 の中から光学特性、且つ機械的特性に優れている材料として ZrO_2、Ta_2O_5、SiN を取り上げ、他の成膜方法で成膜したサンプルと比較を行った。サンプルは PECVD 法の SiN、マグネトロンスパッタ法の ZrO_2、Ta_2O_5 で透過率、膜密度、表面平坦性を比較評価した。それぞれの成膜条件を表 2 に示す。

表 2　サンプルの成膜方法と成膜条件

サンプル	成膜法	ターゲット	基板加熱	プロセスガス	パワー
SiN	ECR	単結晶Si	なし	$Ar+N_2$	500W
	PE-CVD	―	350度	SiH_4 NH_3 N_2	100W
ZrO_2	ECR	Zr	なし	$Ar+O_2$	500W
	マグネトロンスパッタ	ZrOx	なし	$Ar+O_2$	500W
Ta_2O_5	ECR	Ta	なし	$Ar+O_2$	500W
	マグネトロンスパッタ	Ta_2O_5	なし	$Ar+O_2$	300W

石英基板上に膜厚 50nm 成膜し分光光度計（日本分光社製　V-650）で透過率測定を行った結果を図 5 と図 6 に示す。

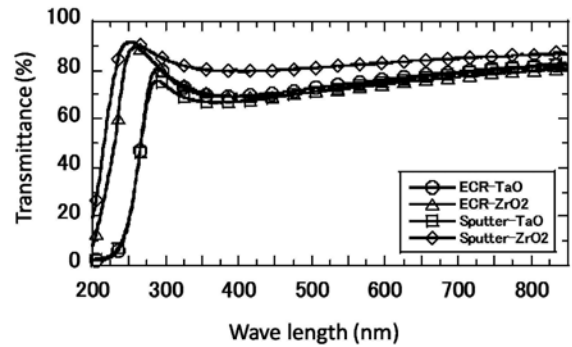



図 5　酸化膜の透過率比較

ZrO_2 では酸化物ターゲットを使用したマグネトロンスパッタ法と同等、Ta_2O_5 では波長 300nm 近辺で優れた透過特性が得られており、金属ターゲットを使用した成膜でも ECR プラズマ法の高密度プラズマによる酸化反応性の良さが表れている。

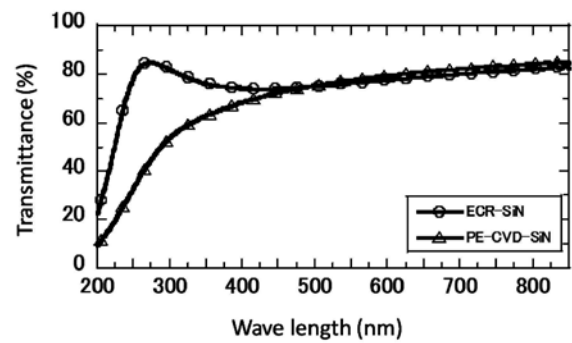



図 6　SiN 膜の透過率比較

PECVD 法の SiN は波長 400nm 近辺から急激に透過率が低下している（図 6）。CVD 法の膜は原料ガスの残留生成物の影響や窒化が不十分などの理由から透明度が低くなるとされている。ECR プラズマ法の SiN はターゲットに単結晶 Si とプロセスガスに純 Ar と N_2 を使用していることから不純物の混入が少なく、さらに高密度プラズマの照射により十分に窒化された透過性の高い SiN が形成できていることが分かる。

次に、Si<100> 基板上に膜厚 50nm 成膜したサンプルの表面平坦性を原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscopy : AFM）で、膜密度を X 線反射率法（X-ray Reflectometer : XRR）で測定した結果を図 7 と表 3 に示す。

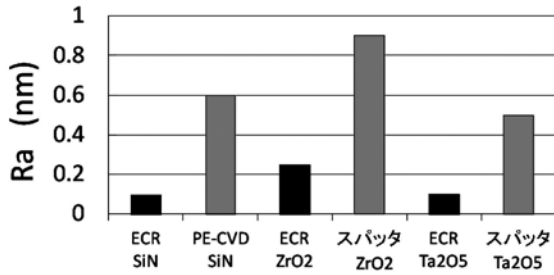



図 7　AFM による表面粗さ測定結果

ECR プラズマ法の SiN、Ta_2O_5 は Si 基板と同レベルの平坦性が得られていたが、PECVD 法、マグネトロンスパッタ法の膜は粒界が存在し表面が荒れていた。ZrO_2 は ECR プラズマ法とマグネトロンスパッタ法ともに結晶粒がみられたが、結晶粒のサイズは ECR プラズマ法が非常に小さい。

表 3　XRR 法による膜密度測定結果

膜 種	成 膜 方 法	密 度 (g/cm³)	理論密度 (g/cm³)
SiN	ECR	3.1	3.24
	PECVD	2.6	
ZrO_2	ECR	5.9	6.02 (立方晶)
	マグネトロンスパッタ	4.9	
Ta_2O_5	ECR	7.7	8.73
	マグネトロンスパッタ	8.5	

ECR プラズマ法の SiN、ZrO_2 は他の成膜法より密度が高い結果となり緻密な膜が形成されている。Ta_2O_5 はマグネトロンスパッタ法に比べ低い結果となった。AFM 観察では ECR プラズマ法の Ta_2O_5 は結晶粒界が観察されず、マグネトロンスパッタ法で粒界が観察されることから膜の組成や結晶構造などが異なることが考えられる。また、後で述べる薬品耐性や硬度の結果では劣っていない結果が得られたため、Ta_2O_5 の物性についてさらに調べる予定である。

上記の結果の様に一般的に ECR プラズマ成膜法は高密度プラズマにより基板表面に付着した材料が十分にマイグレーションし、高い酸化、窒化反応性により透明度が高く、平坦性に優れ且つ理論密度に近い密度の緻密な膜を低温で得ることができる。本成膜装置が半導体レーザー端面コートの標準装置として採用されている理由は、前述の様な優れた特徴を持つ薄膜を端面に形成できるため COD (Catastrophic Optical Damage) と呼ばれる光出射端面の破壊[5]を生じさせないためである。

5.　SiN 成膜と防湿特性評価

SiN は緻密な膜質であることから有機 EL や電子デバイス用フィルム及び SAW フィルターなどの温度上昇を嫌う電子デバイスの保護膜として使用されている。SiN を低温成膜できる一つの成膜法として PECVD 法があるが、低温成膜条件ではバリア特性の低下や透明度の低下を引き起こすとされている[6] [7]。一方、固体ソース ECR プラズマ成膜は高密度プラズマにより無加熱で高品質の窒化膜を得ることが可能であり、成膜時の温度上昇を嫌うようなデバイスにおいても有効な成膜方法と思われる。ここでは ECR プラズマ法での SiN の最適化と防湿特性の評価を行った結果を報告する。

5.1　SiN 成膜条件の最適化

デバイスの生産性に関係する項目として成膜速度が挙げられる。ECR プラズマ成膜法で成膜速度を速める方法はマイクロ波とターゲットに印可するパワーを上げて成膜すればよい。もう一つの成膜速度を決めるパラメータとして Ar 流量がある。ECR プラズマ法では Ar 流量増加に伴いイオン電流密度が上昇するため成膜速度が増加する。

図 8 は標準的なパワーである 500W から 700W に設定し、Ar 流量と窒素流量を変化させた成膜速度と屈折率の関係である。

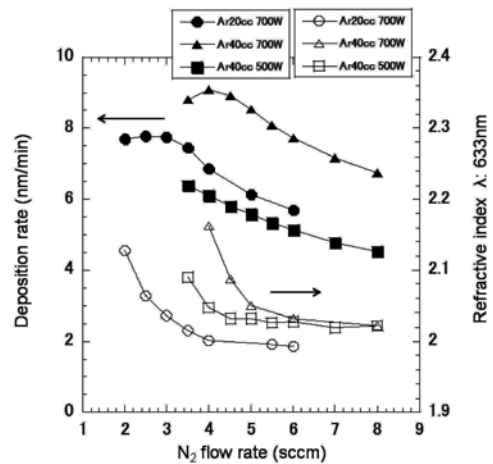



図 8　パワー、Ar 流量に対する成膜速度と屈折率の関係

図 8 の様に投入パワーの増加と Ar 流量の増加で成膜速度を増加させることが可能である。

ここで、700W 条件の屈折率安定領域で屈折率に Ar 流量依存性が見られたため、膜質の確認のために 5% の希フッ酸を使用しエッチング速度を測定した。

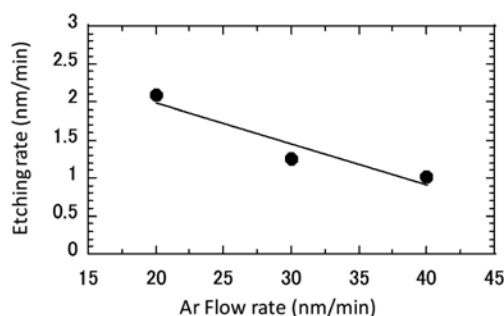



図9　Ar流量に対するエッチング速度

図9の様にAr流量の増加に伴いエッチング速度が低下する傾向が見られた。この原因を調べるためにラザフォード後方散乱分光法（Rutherford Backscattering Spectrometry：RBS）で膜中組成比を、X線反射率法（X-ray Reflectometer：XRR）にて膜密度を評価した。膜厚方向で組成ずれは見られず均一な膜が形成されており組成比も窒化シリコンの化学量論比に近い1.31を示していたが、膜中にAr取り込みがあり図10の様に成膜時に導入するAr流量の増加にしたがってAr組成は減少する結果となった。

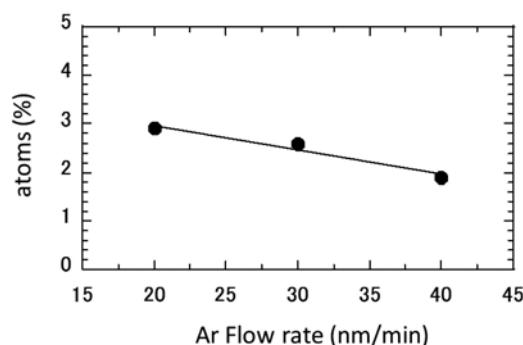



図10　Ar流量に対するAr組成

このような膜中へのArの取り込みはArトラップと呼ばれるスパッタ法でみられる現象であり[8]、図10のように成膜時のAr流量の増加にしたがって膜中へのAr取り込み量は低下するとされECRプラズマ成膜においても同様の結果となった。

ECRプラズマ法ではAr流量を減少させるとプラズマチャンバー内部のArと電子との衝突確率が低下し、電子の平均自由工程が増加する。このためイオンエネルギーが高くなり基板とプラズマ間のポテンシャル差が大きくなりイオンの打ち込み効果が生じ膜中にArが取り込まれたと予想される。

Ar流量はプラズマ密度とイオンエネルギーを決めるパラメータであるが、膜中のAr組成にも関連し膜質に大きな影響を与えることが分かった。

5.2　SiN成膜条件の防湿特性評価

ECRプラズマ法によるSiNの防湿特性を評価するためにPESフィルム上に成膜しモコン法（JIS K7129 B法準拠）にて評価した。測定環境は水蒸気透過度を温度40℃、湿度90%RHの試験雰囲気である。

表4　モコン法評価結果

膜　厚 (nm)	水蒸気透過度 (g/m2・day)	水蒸気透過係数 (g・cm/cm2・s・cm Hg)
50	＜ 0.01	＜ 4.8E-14
20	0.02	9.55E-14

膜厚50nmで測定下限となり優れた水蒸気防湿特性が得られている（表4）。

また、Si基板上にCVD法で成膜されたO_3-TEOS NSG（O_3-tetraethoxysilane-base non doped silicate glass）膜上にECR-SiNを成膜したサンプルを加熱しTEOS NSG膜から放出された水分と水素をTDS（Thermal Desorption Spectroscopy：昇温脱離分析法）で測定した結果が報告されている[9]（図11, 図12）。

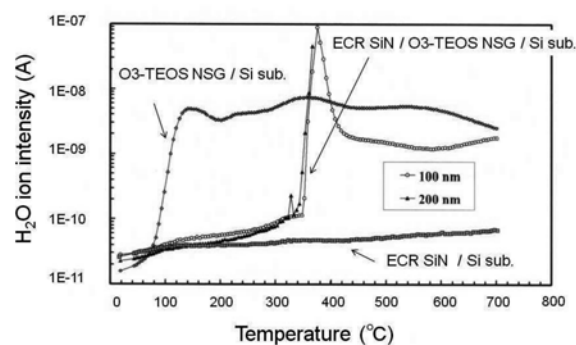



図11　水分子のTDSスペクトル[9]

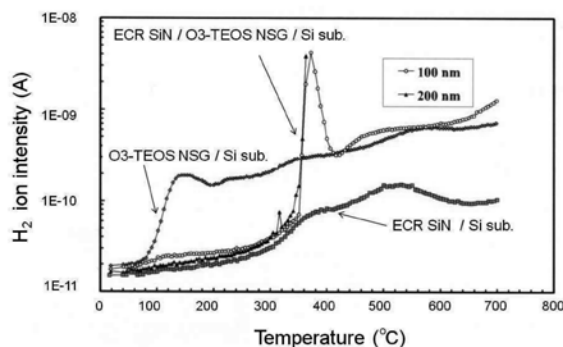



図12　水素分子のTDSスペクトル[9]

TEOS膜は水分と水素を多く含んでおり、SiNを成膜していない基板では基板温度100度付近から水素と水分脱離が始まるが、ECR-SiNを成膜したサンプルは350度程度まで水素と水分が脱離せず非常に高い遮断特性を持ち合わせていることが分かる。

6. ハードディスクヘッド保護膜への応用

ハードディスクのさらなる高記録密度化を実現する一つの記録方式として熱アシスト記録方式（Thermally Assisted Magnetic Recording：TAMR）が提案されている。TAMR方式はヘッド表面から光学波長800nm近辺の光を磁気媒体へ出射する構造とされ[(10)(11)]、従来のヘッド保護膜に求められる硬度、表面平坦性、プロセス耐性に加え、出射光に対して高い透過性が加わることになる。酸化物、窒化物材料の中でこれらを満足するものとしてZrO_2、Ta_2O_5、SiNが挙げられる[(12)(13)]。

ここでは表2に示したサンプルで膜の硬度と薬品を使用する製造プロセスの耐性評価として耐エッチング特性を評価した。

6.1 薬品耐性評価

保護膜が製造プロセスに耐えられるか5%の希フッ酸、アルカリ性のレジスト現像液（東京応化P-7G）でエッチング評価を行った結果を図13に示す。

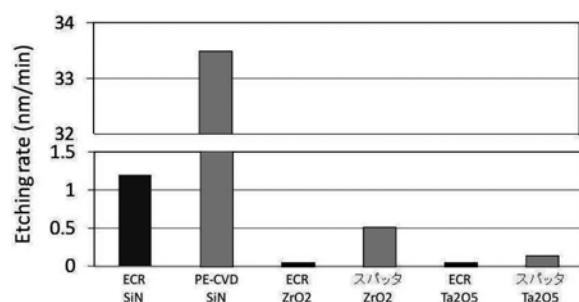



図13　フッ酸によるエッチングテスト結果

アルカリ性のレジスト現像液P-7Gではすべてのサンプルでエッチングされなかったが、希フッ酸で差が見られた。ECRのSiN、ZrO_2はスパッタ法、PECVD法に比べエッチング量の差が大きく膜質が優れていることが分かる。AFMの表面測定ではECR法は非常に平坦であり、スパッタ、PECVDは粒界がみられることから、粒界浸食が起こり上記のような結果になったと思われる。

6.2 硬度評価

膜硬度の一般的な評価方法はマイクロビッカース法などであるが、サブナノレベルの薄膜を評価する場合には基板の硬さが測定結果に影響し評価が困難である。今回の用いた評価方法はAFMを応用したもので、単結晶ダイヤモンド探針で薄膜表面スクラッチし、その摩耗深さから膜の硬度を相対比較する方法である。リファレンス膜を熱酸化Siとし荷重40uNでのスクラッチ痕の深さを測定した結果を図14に示す。

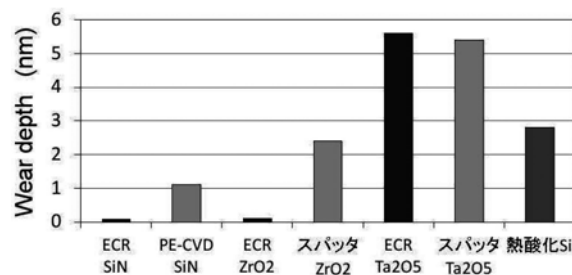



図14　AFMによるスクラッチテスト結果

ECRプラズマ法のSiN、ZrO_2は他の成膜法に比べ非常に耐摩耗性に優れていることが分かる。Ta_2O_5はマグネトロンスパッタ法と同等の結果になった。

エッチング評価、硬度評価の結果からECRプラズマ法のSiN、ZrO_2は熱アシスト記録方式の保護膜として適応できる可能性を見出した。また、熱アシスト記録はヘッドが非常に高温になると予想されているため耐熱評価を今後行う予定である。

7. 結　言

ECRプラズマ成膜法と他の成膜法の薄膜を比較したところECRプラズマ成膜法は優れた保護膜特性を持ち合わせていることが分かった。しかし、実際のデバイスでは様々な膜上に成膜することになり膜同士の相性、動作時の温度など様々な環境で膜特性を維持しなければならない。今後はアプリケーションにマッチした成膜技術の開発を進め、装置販売に寄与できるよう努めると同時に生産性向上の為のスループット向上やコストダウン、パーティクル対策などの装置技術開発も同時に進めていく方針である。

参 考 文 献

(1) 浅田敏明，他：“ウエハレベルチップサイズパッケージ（WL-CSP）の開発”，古河電工時報，第 119 号，(2007.1)，p.13-17

(2) 電子デバイス産業新聞： 2013 年 9 月 18 日号， 1面 http://www.sangyo-times.jp/scn/headindex.aspx?ID=419（参照 2015-4-20）

(3) 村岡裕明：“記録技術の新展開”，映像情報メディア学会誌，Vol. 68, No. 1,（2014） p.32-34

(4) 天沢敬生：“ECR プラズマの光半導体プロセスへの応用”，精密工学会誌，Vol.73, No.9,（2007） p.975-979

(5) 坂元，ほか：“ファイバレーザ励起用高出力半導体レーザモジュール”，フジクラ技報，第 126 号，Vol.1,（2014） p.11-16

(6) 山脇 正也，ほか：“PE-CVD シリコン窒化膜用シラン代替材料の開発”，大陽日酸技報，No.32,（2013） p.31-32

(7) 部家，ほか：“有機 EL ディスプレイ用水蒸気バリア膜の形成”，電子情報通信学会技術研究報告．R，信頼性 105（434），（2005-11-18） p.7-12

(8) 小林春洋：スパッタ薄膜　基礎と応用，p.69-71，日刊工業新聞社，（1993）

(9) M. Takahashi, H. Yamada and T. Amazawa：“Barrier Effect of Electron Cyclotron Resonance Sputtered Films Against Water and Hydrogen Molecules Permeation”, Journal of The Electrochemical Sci., 149, (11), (2002) p. B487-B490

(10) K. Osawa, K. Sekine, M.Saka, N.Nishida, and H. Hatano：“Optical TAMR Head Design for Placing a Heating Spot Close to a Magnetic Pole” KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, VOL.7 (2010) p.122-125

(11) 稲葉，他：“新しい高密度記録技術 エネルギーアシスト磁気記録媒体”，富士時報， Vol.83 No.4,（2010） p.257-260

(12) 中山，他 ：“セラミックスの熱特性と熱応力破壊”，社団法人日本材料学 材料 32(357)，（1983-06-15） p.683-689

(13) 李　正中：光学薄膜と成膜技術，株式会社アルバック訳，p.411-427, アネグ技術センター（2002-9-25）

製品・技術紹介

水素ステーション用300リットル鋼製蓄圧器の開発

1．はじめに

地球環境問題の観点からクリーンエネルギーとしての水素の利用が注目されており、国内では2015年度までに100箇所程度の商用水素ステーションを建設することが発表されている。また、2014年12月にトヨタから燃料電池自動車“ミライ”が販売開始され、2016年3月にホンダからも燃料電池自動車の販売開始が予定されており、燃料電池自動車および水素ステーションの普及に向けた取り組みが活発化している。また、政府は2020年の東京オリンピックに向けて水素インフラの整備を進め、水素社会を世界に向けアピールする方針を表明していることから、国内では今後も水素社会の実現に向けた動きが活発になると予想されている。

当社は材料の水素脆性に対する長年の知見を活かし、世界に先駆け2008年に70MPa水素ステーション対応の250リットル鋼製水素蓄圧器（Type Ⅰ蓄圧器）を、2012年に世界最大容量の高耐久型450リットル鋼製水素蓄圧器をNEDO事業において開発し、実証試験を進めてきた。これらの知見を活かし、現在、商用水素ステーション向けに容量を最適化した高耐久型300リットル鋼製水素蓄圧器をいち早く上市し販売しており、岩谷産業㈱殿が尼崎に建設した日本初の商用水素ステーションでも当社の蓄圧器が使用されている（写真１）。

写真１　日本初の商用水素ステーションと水素蓄圧器
（写真提供：岩谷産業㈱殿）

2. 概　要

当社の蓄圧器は、ストレート形状のボディーに、両端カバーとグランドナットを組み合わせた形で構成され、応力集中部となるような不連続部をなくし、加圧されることで密閉性を高めるセルフシール構造を採用している。本蓄圧器の主な仕様を表１に示す。蓄圧器の設計圧力は99MPaとし、一般高圧ガス保安規則で規定されている水素ステーションの運転圧力上限の82MPaに対して充分な余裕を持たせていると共に、将来的な運転圧力の高圧化にも対応できるように設計されている。寸法は外径φ480mm、長さ5,060mmであり、製品重量は約4.7tonである。また、水素ステーションに用いられる蓄圧器は燃料電池自動車への充填による減圧と次の車への充填準備のための加圧が繰り返されるため、燃料電池自動車が普及する将来を見据え、高圧ガス保安協会（KHK）申請時の初期繰返し使用回数を10万回としている。鋼製蓄圧器の場合、材料に繰返し応力を加えても破壊しない疲労限度より更に小さな応力範囲で使用されており、10万回が使用限度ではなく定期的な保安検査において欠陥等の発生がないことを確認できれば、繰返し回数を延長させても安全を確保可能な製品である。本蓄圧器は、KHKの包括事前評価を取得しており、高い安全性と信頼性を実現している。

表１　300リットル鋼製蓄圧器の仕様

適用法規	高圧ガス保安法
適用規格	特定設備検査規則
設計圧力	99MPa
設計温度	-15℃～+70℃
運転圧力	35MPa～82MPa
運転温度	-10℃～+70℃
繰返し使用回数	10万回
蓄圧器外径	φ480mm
蓄圧器全長	5060mm
蓄圧器重量	4.7ton
耐用年数	無制限

3. 特　徴

(1) 高強度低合金鋼の使用

一般高圧ガス保安規則の例示基準では、水素ステーションに使用可能な蓄圧器用鋼材としてニッケル当量と絞り値で規定されたSUS 316、SUS 316Lに限られているが、これらの材料は高価であり、材料強度が低いことから設計圧力を99MPa、内径300mmの蓄圧器として設計した場合の肉厚は約300mmの極厚容器となる。一方、高強度低合金鋼を使用することで肉厚を薄くすることができるが、45MPa蓄圧器に使用されているSCM435では、99MPa蓄圧器の肉厚となると焼入れ性不足のため必要な材料特性を得ることが出来ない。そこで、

SCM435と同等の強度を持ち、焼入れ性の優れるSA-723M Gr.3, Cl.2を採用した。SA-723Mはアメリカの圧力容器規格 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2で使用が認められている材料であり、また国内においても超高圧ガス設備の耐圧部用の材料として、HIP装置本体、大型反応器等で使用可能な材料として例示されている。SA-723Mを含む高強度低合金鋼は比較的安価な材料であるが水素の影響を受ける材料であるため、通常の圧力容器に要求される材料評価に加え水素ガス中での各種安全性評価（機械的特性、疲労特性、ASME Section VIII, Division 3のKD-10をベースにした疲労き裂進展特性の試験・解析等）を行い、安全性を確認している。このような評価を行うことで鋼に及ぼす水素の影響を正確に把握し、その耐性に応じた条件で最大限の能力を発揮させることは、蓄圧器の安全性と低コストを同時に満足する有効な技術である。

(2) 耐水素脆性

蓄圧器は、製造の各工程において水素脆性の影響を低減させるための種々の対策を施している。溶製から熱処理までの素材製造段階では、組織や強度、結晶粒度等をコントロールし、水素ガス中であっても大気中と同等の引張強さを確保している。また、加工段階では、加工方法を指定し、厳しい表面仕上げ状態を合格基準に設けている。

(3) 高耐久化施工

高圧水素ガス中においては大気中と比較してき裂進展速度が加速するため、高耐久化施工によりき裂進展速度の抑制を図った。図1に高圧水素ガス中において実測した試験結果を用いて解析した蓄圧器ボディのき裂進展解析結果を示す。外面からの超音波探傷試験（UT）により検出可能な長さ4.8mm、深さ1.6mmの初期欠陥が存在すると仮定した場合において、安全率を考慮した許容可能な繰返し回数は6.5×10^7回であることが示された。また、高圧水素ガス中における疲労試験においても、疲労限度が運転時に発生する繰返し応力の2倍以上であることが確認されており、蓄圧器の高寿命化が達成されている。

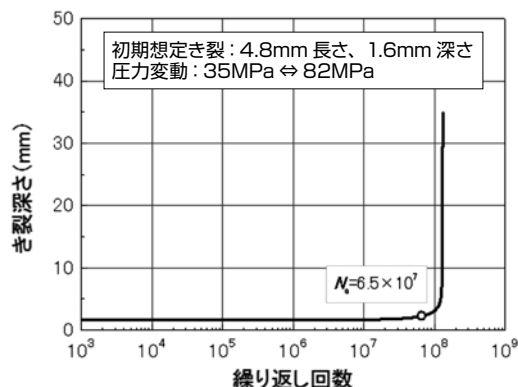



図1　蓄圧器ボディのき裂進展解析結果

(4) 高信頼性

当社の蓄圧器はストレート構造としており、水素と接する部分において、ボンベ型蓄圧器の口元で観察されるようなしわ疵や構造不連続部位などの応力集中する箇所がないこと、製造時や供用中の検査において内面の精密検査が可能であるなどの特徴も有している。製造時の検査においては、水素ガスと接するボディー内表面を高精度で検査するため、写真2に示す半自動の磁粉探傷試験（MT）装置を蓄圧器専用に開発した。この開発したMT装置を用いて検査することで、内表面の微小な欠陥の検出を可能としている。また、高精度の検査は製造時だけでなく、供用中であってもカバー・グランドナットを外し開放することで可能となる構造であり、定期的に解放検査を行うことで安全性を維持できる蓄圧器である。

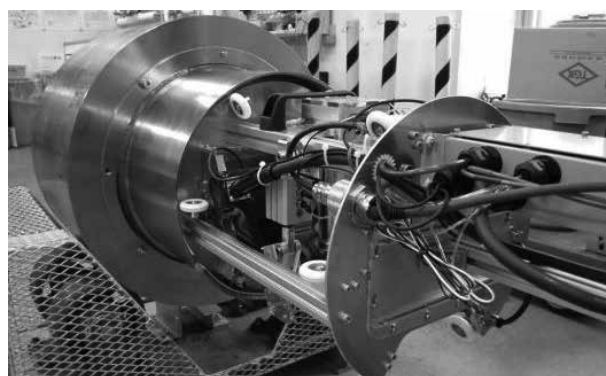



写真2　開発した蓄圧器専用MT装置

4. おわりに

可燃性ガスであり広い爆発限界範囲を有する水素ガスは、扱いを間違えれば非常に重大な事故となる可能性があることから、安全を第一に信頼性の高い蓄圧器を提供することが重要と考える。当社では、写真3に示す低コスト化、軽量化を進めたTypeⅡ（金属ライナー+フープ巻き）蓄圧器を現在開発中であるが、これらの蓄圧器にも高信頼性を引き継ぎ、安全な蓄圧器を提供していく所存である。

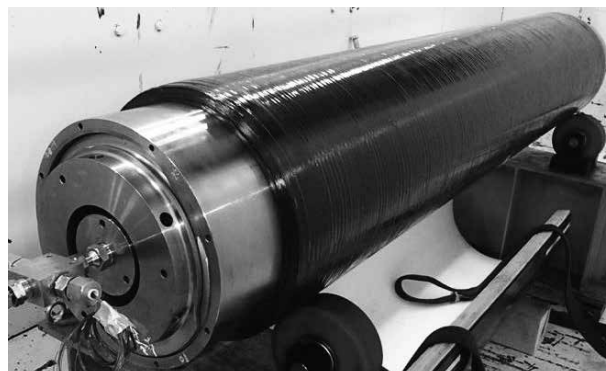



写真3　耐圧試験中のTypeⅡ試作蓄圧器

謝辞　蓄圧器の開発における水素ガス中のデータは、NEDOの支援を受けた委託事業の結果得られたものであり、感謝申し上げます。

小型 UWC＆PCW 装置の新シリーズ“SDC”＆“NCW”

1．はじめに

UWC（アンダーウォーターカット）法は、安定した品質のペレットの連続的な生産と自動化による作業の省力化に効果的な造粒法であり、弊社は研究開発用ラボ機から大型プラント用造粒機まで幅広いUWC装置の納入実績を有している。この度、最新技術を盛り込み、小型・高機能を進化させた小型UWC装置“SDC”と清掃性に優れた小型PCW装置“NCW”を開発したので以下に紹介する。

2. 基本仕様

小型UWC ＆ PCW装置シリーズの基本仕様を表1に示す。本シリーズは、コンパウンディング市場を主なターゲットとし、小型UWC装置は“SDC-3”、“SDC-5”、“SDC-10”の3機種、小型PCW装置は“NCW150”、“NCW250”、“NCW420”の3機種をラインナップしている。

表1　SDC ＆ NCW シリーズの基本仕様

UWC/PCW 装置型式	SDC-3 / NCW150	SDC-5/ NCW250	SDC-10 / NCW420
処理量　kg/h	Max.100	Max.1000	Max.2500
カッター回転速度　rpm	Max.5000	Max.5000	Max.3600
カッターモーター動力　kW	3.7	5.5	11
ドライヤーモーター動力　kW	0.75	2.2	3.7

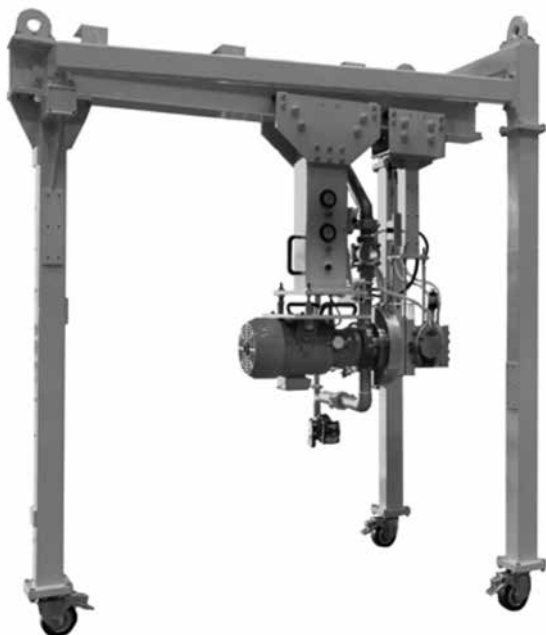



写真1　UWC装置　“SDC-5”の外観

3. 特　徴

【小型UWC装置“SDC”（Smart Direct-drive Cutter）】

・自動押圧機構

カッターユニットの自動押圧機構により、刃の摩耗による運転中の追い込み作業が不要となる。また、押圧を一定にコントロールすることにより、刃の摩耗速度の管理が可能となり、カッター刃の長寿命化が図れる。

・自動調心機構

カッターヘッドに自動調心機構を採用したことにより、ダイスとカッター軸のアライメント調整が不要となり、長期連続運転において安定したペレット形状を造粒可能である。（日本・米国・欧州にて特許取得済み）

写真2
フローティングカッタヘッド

・ワンタッチクランプ

カッターユニットと循環箱の締結はワンタッチクランプ方式を採用し、容易かつ迅速な脱着が可能である。

・ヒーター加熱

ダイスの加熱はカートリッジヒーターによる電気加熱方式を採用し、ホットオイルユニット等の加熱装置が不要である。

・吊り下げ式カッターユニット

吊り下げ式カッターユニットの採用により、フロアーの作業スペースを大幅に拡大することが可能である。

また、狭い設置スペースに対応したコンパクトな台車式も選択可能である。

写真3　カッターユニット

・押圧自動調整システム（オプション）

最適な押圧を自動で設定・調整する「押圧自動調整システム」が搭載可能である。このシステムにより、運転中のカッター刃の最適な押圧が設定可能となり、ダイスとカッター刃の更なる長寿命化が図れる。

【小型 PCW 装置“NCW”
（Nikko Pellet Conveying Water system）】

・ユニット化

ポンプ、クーラー、遠心脱水機、排気ファン、循環水タンクなど必要な機器を一つのスキッド上にコンパクトにまとめて設置しユニット化している。動力配線とUWC装置との接続配管、ユーティリティ配管を接続すればすぐに使用可能となる。

・優れた清掃性

小型化と清掃性を両立した新開発の遠心脱水機を採用している。カバーは軽量かつ脱着も容易で、カバー間口を広くしたことで内部の隅々まで容易にアクセス可能である。内部の部品も容易に脱着が可能で、安全に素早く遠心脱水機内部の清掃作業が可能である。

また、循環水タンクに組み込んだ傾斜型スクリーンは、循環水から切粉を取り除き、運転を止めることなく、容易に清掃が可能である。また、清掃中タンク内に切粉が混入しない様、バックアップスクリーンを設置している。

写真 4　PCW 装置 “NCW150”の外観

写真 5　遠心脱水機

・運転中の視認性

アグロメキャッチャーの入り口に設置したサイトグラスより、遠心脱水機へ流入するスラリーの状態を運転中に確認可能である。

写真 6　サイトグラス&アグロメキャッチャー

4. おわりに

生産品種の切り替えが多いコンパウンド製造においては、装置のメンテナンス性が重要である。

今回紹介した“SDC”&“NCW” シリーズは、小型低重量で省スペース化を図りながら、高処理量を実現している。また、オペレーターに芯出し技術を要求しない装置構造と自動スタート機能による容易な運転立ち上げ、移動・据付けが容易なコンパクト構造、清掃が容易な構造などを同時に実現している。

今後もUWC法に関する技術を高め、お客様に対してより良い装置を提供するための開発を継続していく所存である。

新型 Rotary Slot Bar（新型 RSB）

1．はじめに

近年、ポリオレフィンの新規プラントの生産能力は年々増加傾向にあり、それに対応可能な大型の造粒機が求められている。造粒機は1系列の設備にて、様々な特性や粘度を有する樹脂を均質化するために広範囲な混練調整能力が求められている。

混練調整機構には様々なタイプがあるが、その基本機能は、スクリュが内蔵されているシリンダ内の樹脂流路の形状を変化させることにより発生する圧力損失をコントロールし、混練調整機構上流の混練スクリュにおける樹脂充満長を変化させ、スクリュの混練度合いを調整するものである。

当社の代表的な混練調整機構に Rotary Slot Bar（以下、RSB）がある。RSB は、装置内に組み込まれた上下2本のスロットバーを回転させることで、樹脂流路形状を変化させる独自の機構を採用している。RSB は、スロットバーが円柱形状であることから高精度の機械加工が可能であり、かつスロットバーが回転する比較的簡単な機構であるためシール性が高く、機内への酸素混入を最小限にできる装置として好評を博している。

このような特徴を持つ RSB の混練調整能力を更に向上させた“新型 Rotary Slot Bar”（以下、新型 RSB）を開発したので、以下に紹介する。

2. RSB の構造

図1に、RSB の構造の概略図を示す。シリンダに挿入された2本のスロットバーが、矢印の方向に高精度に回転することにより、シリンダ内の流路形状を変化させる構造である。

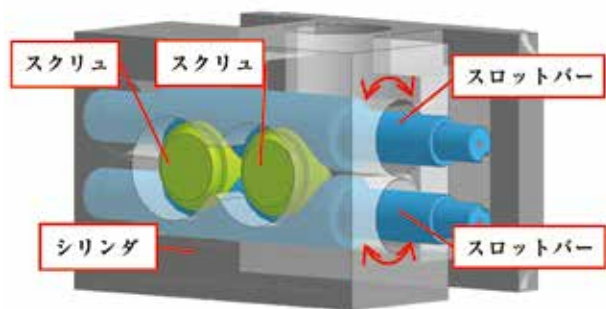



図1　RSB の構造

生産機に搭載された RSB を写真1，2に示す。RSB はゲートタイプのような従来型の混練調整機構に比べて非常にコンパクトな装置であることが分かる。

写真1　CIM 全体

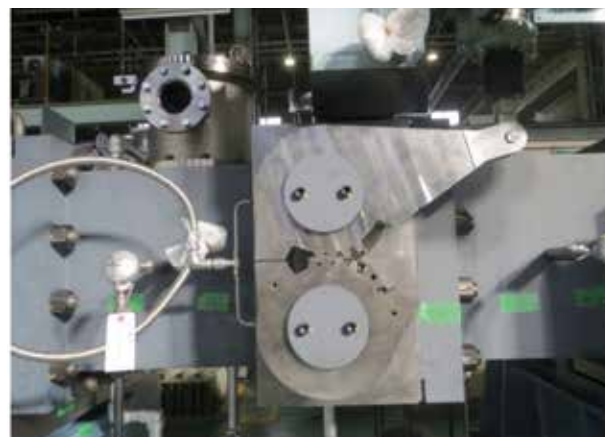



写真2　RSB 部拡大

3. 新型 RSB の特徴

スロットバーを全閉状態にした時のスクリュ軸直角方向から見た従来型 RSB の断面図を図2に、新型 RSB の断面図を図3に示す。図中には、樹脂流路断面におけるスクリュとスロットバーの位置関係も示した。

新型 RSB は、従来型 RSB に比べ、全閉時の圧力損失を大きくするためにスクリュ外径を小径にし、かつスクリュとスロットバーの重なり部分を大きくする構造を採用した。

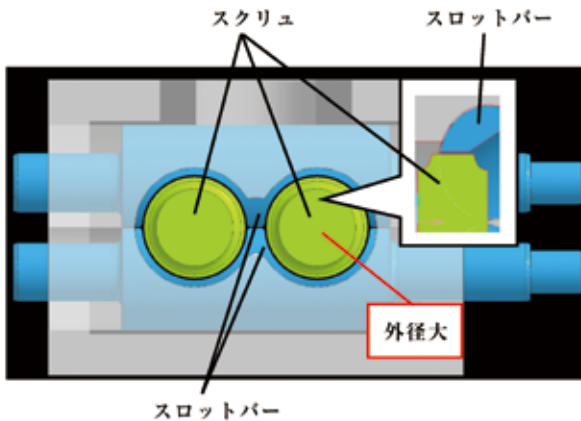



図2　従来型 RSB

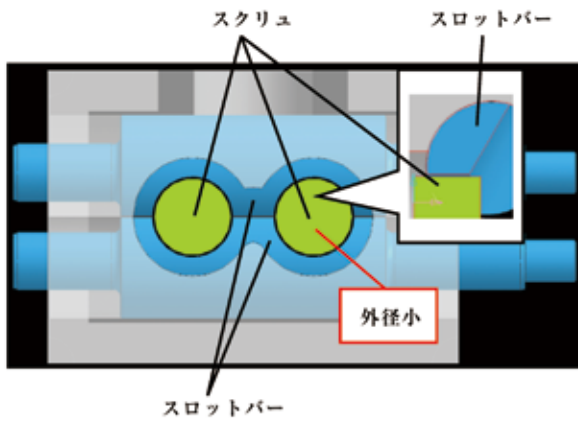



図3　新型 RSB

4.　新型 RSB の混練調整能力

当社の技術開発センター設置の CIM90 にて従来型 RSB と新型 RSB の HDPE（MI=0.5/190℃, 5kg 荷重）に対する混練調整能力の比較試験を実施した（図 4）。混練調整能力は比エネルギーの制御幅（以下、⊿ Esp）にて評価した。

従来型RSBは開度0%から100%において⊿Esp=0.03kWh/kg となったが、新型RSBでは⊿ Esp=0.09kWh/kg となり、従来型RSB に比べ約 3 倍に拡大した。

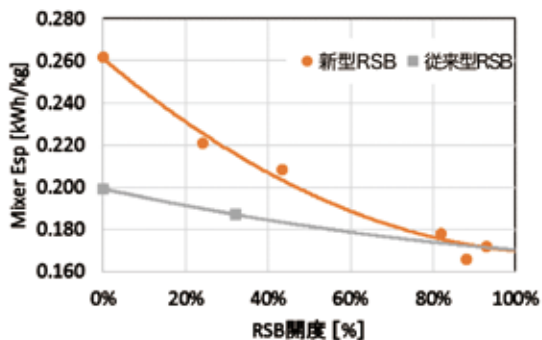



図4　新型 RSB と従来型 RSB の混練調整能力の比較

5.　おわりに

ポリオレフィンの大型造粒機市場では、現在 1 系列当たり 100ton/h の生産量の需要がある。このたび開発した新型 RSB を採用することで、従来型 RSB より広範囲な混練調整が可能となり、多種多様な樹脂銘柄の高処理能力生産に対して大いに貢献できると確信する。これからも、お客様にご満足いただける装置を提供し続けられるよう技術開発を継続していく所存である。

新型射出成形機「J-ADS」シリーズの紹介

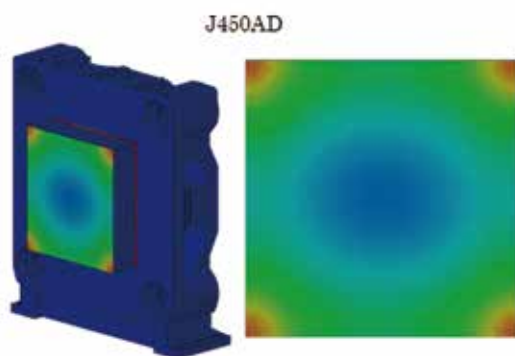
1．はじめに

近年、射出成形機市場のニーズは変化してきており、性能が高いことを前提として、使いやすさやメンテナンス性、成形安定性、ランニングコストなどスペック表には現れにくい性能が重視されるようになってきている。

これらのニーズに応えるため、「全てのお客様に最大限の安心を」をコンセプトに掲げ、中型 J-ADS シリーズ（型締力 220tf ～ 450tf）を開発したので、その特長を紹介する。

2. 特　長

(1) 第二世代フラットプレスプラテン

中型 J-ADS シリーズにおいても継続採用しているダブルトグル式型締装置には、直圧式型締装置と比べて金型パーティング面の面圧分布が外周部に偏りやすいという欠点がある。この問題を解決するために、J-ADS シリーズでは徹底して FEM 解析を行い、盤面全体の変形量を均一にすることで面圧のばらつきを最小化する設計を行った。面圧分布の解析結果を下図に示す。これにより従来シリーズと比べて金型パーティング面の面圧のばらつきを約 55% 改善し、型締力の低減、成形品品質の向上や金型メンテナンスコストの削減などに貢献している。

(2) 高精度可動盤ガイド

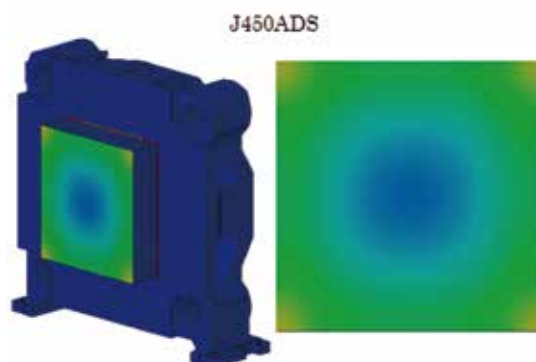
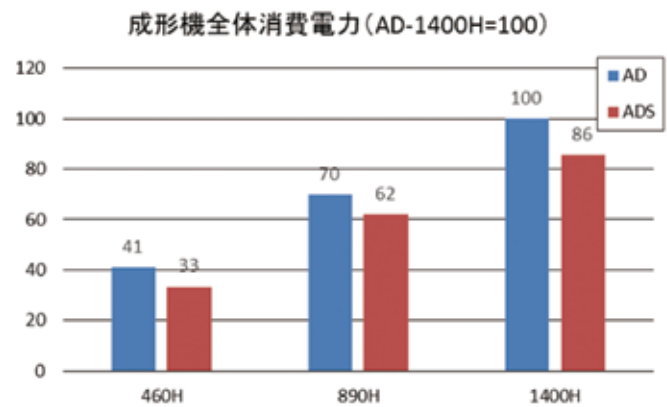
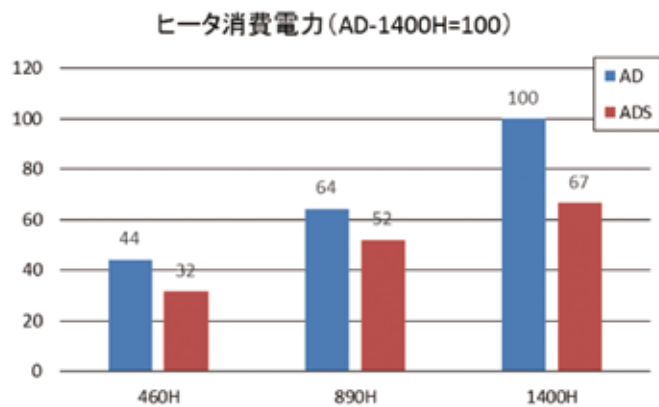
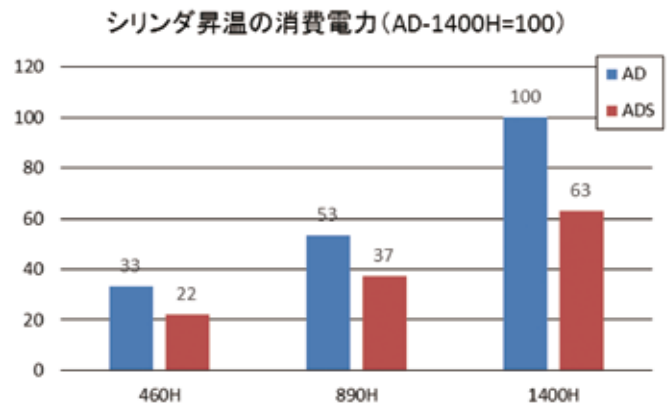
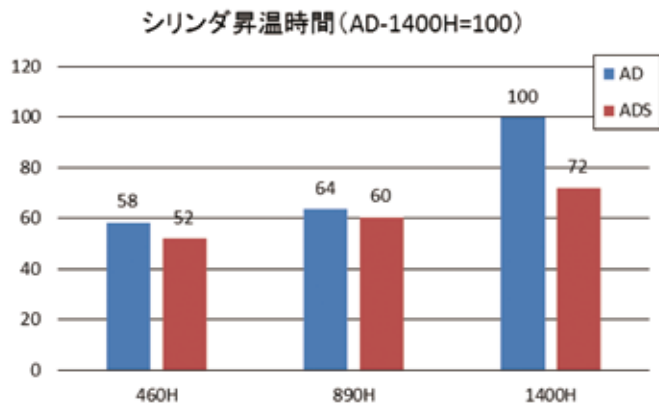
中型 J-ADS シリーズでは可動盤のガイド機構に直動ガイドを採用している。直動ガイドを採用することで、可動盤の直進性の向上と長期間に渡る直進性の維持が可能となる。またタイバーブッシュから漏れたグリスが型盤の盤面や成形品に付着する問題を完全に撲滅できる。さらに直動ガイド化により、成形機全体のグリス使用量を従来機比で 10% 削減し、クリーン化だけではなくランニングコスト削減にも貢献している。

(3) ワイド型盤・デーライト延長

樹脂成形品への要求の多様化、複雑化により、それを成形するための金型も複雑化し、大型化する傾向にある。このような金型に対応するため、J-ADS シリーズでは従来はオプション対応していたタイバー間隔のワイド化とデーライト 100mm 延長を標準仕様とした。これにより、設備ダウンサイジングとイニシャルコスト低減を可能にしている。

(4) 新開発の省エネシリンダ

射出成形機のシリンダ内圧は一般的な機種でも 200MPa 以上になる場合があり、この高い圧力に耐えられるよう、シリンダには高い強度が求められる。J-ADS シリーズは日本製鋼所で開発した、従来比 1.5 倍の強度を持つ鋼材を母材に使用することで、シリンダを小径化することに成功した。社内テストの結果では、連続成形時の消費電力を約 10% ～ 20% 削減することができた。また昇温時の消費電力は約 30%、昇温時間は 10 ～ 30% 程度削減することが可能であり、段取り時間の短縮に貢献できる。

J450AD

3. おわりに

ここでは割愛したが、J-ADSシリーズには新開発したSYSCOM5000iコントローラを搭載しており、使いやすさの向上とお客様の生産性の向上に大きく貢献できると考えている。今後はシリーズ化を進めると共に、市場のニーズを捉えたよりよい製品を提供できるよう、研究開発に邁進する所存である。

射出機用コントローラ SYSCOM5000i

1．はじめに

弊社では、電動射出成形機 J-ADS シリーズを開発し、中型 4 機種を 2015 年 3 月より販売開始した。

本稿では、この J-ADS シリーズ用に開発した新型コントローラ SYSCOM5000i の特徴について紹介する。

2. 特　徴

SYSCOM5000i コントローラは、スマートフォンやタブレット端末などで広く使われているマルチタッチ OS を射出成形機として初めて導入し、画面レイアウトを全面的に見直すことにより、成形条件の設定が分かりやすく、直感的に機械を操作することのできるユーザーインターフェイスとなっている。コントローラの外観を写真 1 に示す。

写真 1　SYSCOM5000i 外観

2.1　画面構成

成形機を操作するための画面を目的ごとにグループ化し、作業内容に合わせた複数の画面アプリとして構成している。

これらの画面アプリは、写真 1 に示すように、ホーム画面に一覧表示され、ユーザーはそこから目的に合わせた画面アプリを起動して成形機を操作する。

画面の基本レイアウトも操作性を高めるために全面的に見直している。

例えば、図 1 に示す成形条件設定アプリでは、従来 SYSCOM3000 コントローラにおけるコンビニモニタ部を拡張した上部「モニタ部」と、設定値の入力を行う下部「操作部」の 2 画面構成としている。こうすることで、それぞれ独立してページを切り替え、モニタ値やショット毎の測定値を見ながら成形条件の微調整ができるようになっている。

それぞれの画面は、タブレット端末などでおなじみのフリック操作により、軽快に切り替えることができる。

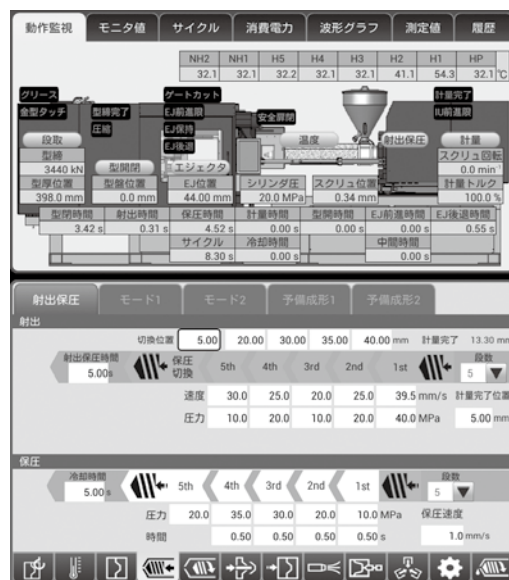



図 1　成形条件設定アプリ

また、現在の成形動作を直感的に把握できるよう、新たに成形動作の工程図表示を採用した。

例えば、図 2 に示すように現在の計量後制御モードにあわせて工程図が切り替わり、そのモードではどのような動きをするのかが一目瞭然となるようになっている。

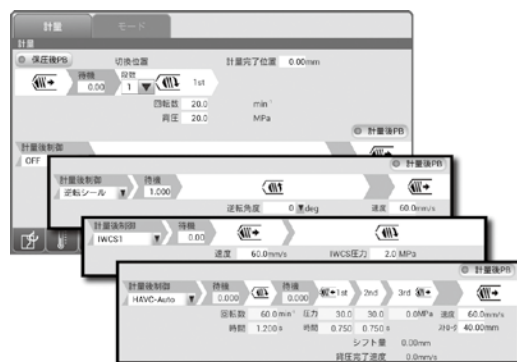



図 2　計量後制御モードの工程図表示

2.2　シートキーとレバースイッチ

従来コントローラ画面上に表示されていた成形モード切り替えボタンは、画面下のシートキーで操作する方式とした。これによって、コントローラ画面が消灯状態になっていても成形機の運転状態が確認できるようになっている。

一方で、型開閉やエジェクタ前後進は従来どおりのレバースイッチ操作を継承しており、金型を覗き込みながら動作確認を行う場合でも安全に操作できるようになっている。

さらに、中子の入り抜きやネジ抜き、シャットオフノズルなどの動作ボタンもシートキーで操作する方式とし、直感的に操作できるレバースイッチともあいまって、オペレータに優しいコントローラとなっている。

2.3　成形支援と予知保全

「初心者にもやさしいコントローラ」を目指し、成形支援のための「J-Assist アプリ」を搭載した。

例えば、図 3 に示すように、金型の取り付けから段取りの方法や設定値の入力をガイドする「成形準備ウィザード」、成形品重量や樹脂の種類から初期成形条件を計算する「初期成形条件設定」、成形不良の種類から成形条件の調整ポイントをガイドする「不良対策ヒント」などの機能を追加している。

また、成形機の突然の故障を未然に防ぐために、冷却ファンの点検時期やボールネジの点検目安をお知らせする予知保全機能を強化している。

図 3　J-Assist アプリ

2.4　I/O カスタマイズ機能

従来から成形機の動作タイミングを周辺装置に出力する機能はあったが、さらに外部信号を組み合わせてより複雑な信号出力をプログラミングできる I/O カスタマイズ機能を搭載している。

この機能により、お客様独自でコンベアなどの周辺装置の動作を制御することができるようになっている。設定画面の例を図 4 に示す。

図 4　I/O カスタマイズアプリ

2.5　取扱説明書の内蔵

成形条件設定アプリでは、設定項目を長押しすることで「？」ボタンが表示され、これを押すことで、図 5 に示すように該当部分の取扱説明書が表示されるようになっている。これによって、成形条件設定の疑問点がその場で解決できるようになっている。

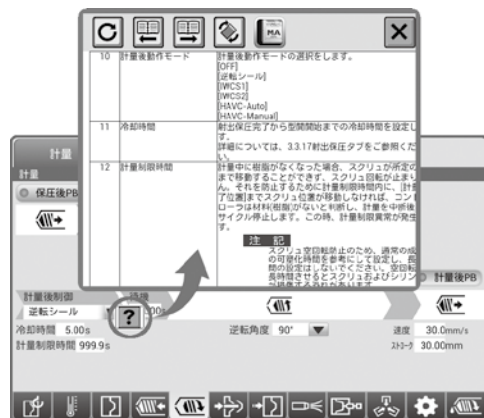



図 5　取扱説明書の表示

3.　おわりに

以上、J-ADS シリーズ機に搭載される新型コントローラSYSCOM5000i の特徴について紹介した。今後は、更なる機能改善と操作性の向上に取り組み、より使いやすく、お客様の生産性向上に寄与するコントローラ開発を進めていく所存である。

第5/6世代ガラス基板対応エキシマレーザアニール装置

1． はじめに

現在フラットパネルディスプレイ（FPD）業界における中小型パネルは世界中に普及したスマートフォンやタブレット用途として市場が急成長しており、その高精細化がディスプレイ性能向上の鍵として各社激しい開発競争を繰り広げている。低温多結晶（LTPS）シリコン TFT はその高精細化や有機 EL（OLED）ディスプレイに欠かせない技術として、日本・韓国のみならず近年中国に大型工場が続々と建設されている。

当社は 2011 年に第 5・6 世代対応エキシマレーザアニール（ELA）装置を上市して以来、業界標準のシリコン薄膜の結晶化装置として、日本・中国を始め多くの LTPS FPD メーカーに採用され、FPD 業界に貢献している。

2. 特 長

ディスプレイ製造現場に於いて求められているのは、均一な多結晶化とその生産性である。これらの実現のために当社の ELA 装置は以下のような特長がある。

1. レーザ光源

光源となるコヒレント社製 VYPER™ レーザ（図 1）は 308nm の波長を持つエキシマレーザであり、1J-600Hz を発振する 2 つのユニットにより 2J-600H（1200W）のレーザ発振が可能である。パルスエネルギーの安定性は $(1\sigma/\text{Ave.})/100 \leq 0.45$ を実現しており、ELA 工程におけるショットムラの軽減に役立っている。また、第 8 世代ガラス基板対応を見越した 2400W の TwinVYPER™ レーザも登場している。

2. 光学系

ELA 装置に搭載されている光学系はホモジナイザにより均一なラインビームに形成される。現在主流の 750mm 光学系は、第 6 世代ガラス基板（1500 × 1850mm）を均一に 2 スキャンで照射するのに最適に設計されている。ELA 装置は主に中小型ディスプレイ用途に使われているが、750mm 光学系では 59 型、1300mm 光学系では 100 型までの大型ディスプレイが製作できる照射長さが確保されている。

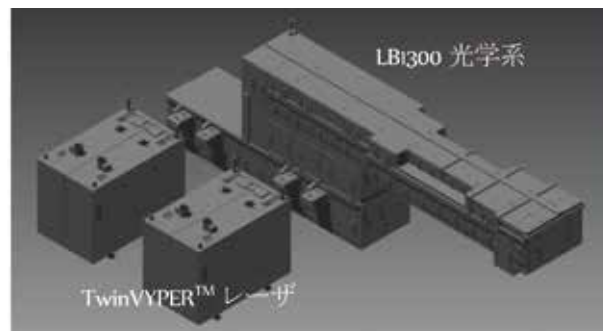



図 1　TwinVYPER™ レーザ／ LB1300 光学系

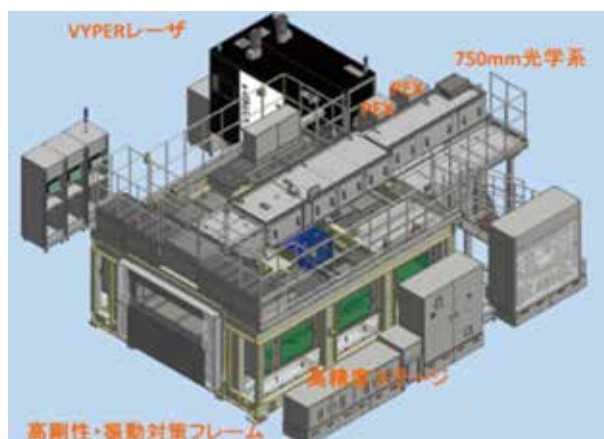



図 2　ELA 装置概要

3. アニーラー

3.1. 構造

ELA 装置として求められる基板照射性能はビーム安定性と基板上の照射位置決め精度である。装置内外に発生する微小な振動は光学系やガラス基板搬送ステージに対し μm 単位の変位として影響を及ぼす。当社装置は構造解析を用いて光学系を高剛性のフレーム上に搭載し、ステージ上でのビーム振動が少ない構造を採用している。

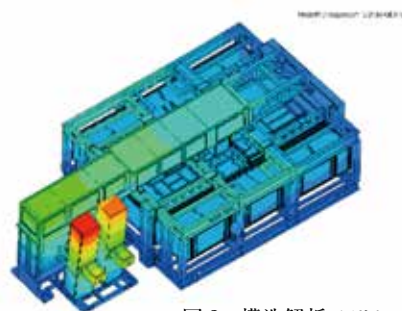



図 3　構造解析モデル

3.2. ステージ

ガラス基板を搬送するステージは、パルス毎のラインビームの位置が定位置となるよう比較的低速域での速度安定性が求められる。リニアモーター / エアベアリング方式により、第6世代対応のストロークを維持しつつ速度安定性は± 1% を実現している。また、エアベアリングに集塵排気機構を設け、動作中にパネルの不良要因となるパーティクルを除去する機構を搭載している。

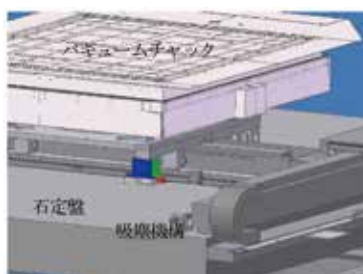



図 4　ステージ吸塵機構

3.3. ガラス基板試料台

第 6 世代ガラス基板上に均一な照射を行うためには、ビームの焦点深度± 125μm 以内の平面度を持つ基板試料台が必要である。また広大な面積を持つ試料台の重量増加はステージ精度への負荷が増大するため、材質・構造上の工夫により最小限の重量にて面内平面度は±30μm 以下を実現している。

3.4. 照射雰囲気

照射雰囲気は結晶化 Si 膜の各種特性に影響を与える。独自の工夫を施した局所シール機構により、750mm ラインビームの全域に渡ってレーザ照射エリアの雰囲気を制御しており、残留酸素濃度は 50ppm 以下を達成している。流体解析により最大 1300mm ビームまで対応可能である。

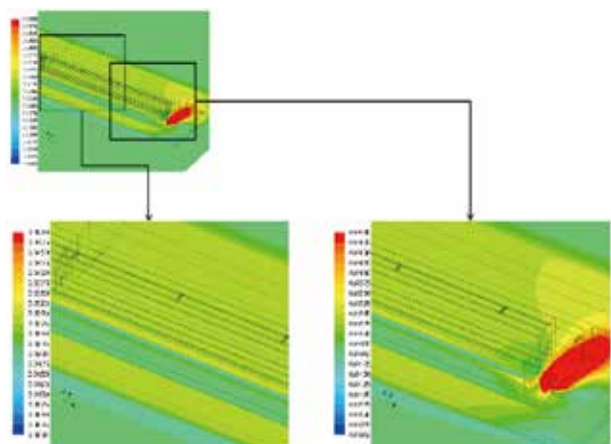



図 5　雰囲気流体解析

3.5. 各種モニターシステム

顧客製品の性能向上に伴い、ELA プロセスに関連するパラメータについて常に状態を監視・分析できる機能が必要とされる。ビーム形状の均一性を評価するビームプロファイラー、ビーム空間安定性を管理するためのビームスタビライザーが搭載されている。また、運転中のレーザパルスエネルギ安定性、照射雰囲気等の他、光学系部の振動状態を計測する振動モニター、パルス波形の安定性を計測するパルス波形モニター等プロセス関連パラメータも常時オンライン監視、記録することが可能である。

一方 ELA 装置についてはラインビームをパルス毎に基板走査する照射方法を取るため、パルス毎やビーム進行方向に現れるムラが製品パネル不良につながる問題となる。このムラ目視検査は顧客の経験に依存するところが多く、定量的かつ客観的な評価をすることを目的としてムラモニター（図 6）が搭載されている。現在ラインカメラタイプが開発され、300mm の広い範囲を同時計測することが可能である。

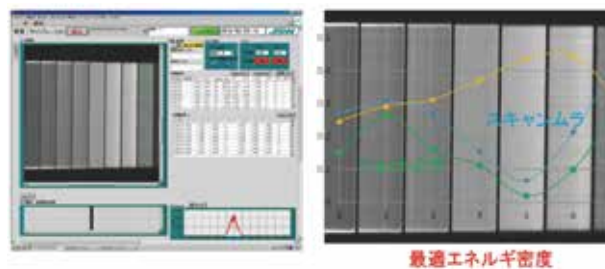



図 6　ムラモニター

3.6. プロセス技術

レーザのパルス波形は Si 薄膜の溶融再結晶化現象に大きく係わる因子である。当社では光学的にパルス波形を伸ばす PEX（Pulse EXtender）によりエネルギマージンの拡大やムラ改善に効果があることに着目し、仕様の最適化に取り組んできた。現在では多くのユーザに使用されているが、定性的な効果のみならず、その結晶性の違いについても分析し、装置メーカーとして顧客の目指す製品作りに一歩踏み込んだ仕様提案を行っている。

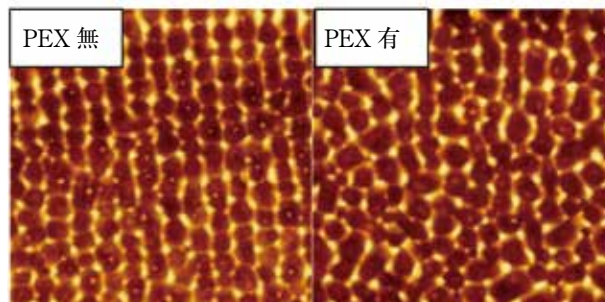



図 7　PEX による結晶性比較

4. 仕　様

ELA 装置の主要仕様を表 1 に示す。さらなる大出力レーザ・長尺ビームにも対応可能な体制を整えている。

表 1　G5.5/G6 ELA 装置構成

アニーラー
• 高剛性フレーム構造 • リニアモーター・エアスライド方式 • 対応基板サイズ：～ 1500 x 1850mm • ステージ速度安定性：± 1% (12mms^{-1}) • 照射雰囲気：N_2 (酸素濃度 $\leq$ 50ppm) • ムラモニター、振動モニター

光学系
• ビーム長：750 ～ 1300mm • PEX (パルス波形調整) • ランダム マイクロスムージング • ビームスタビライザー • ビームプロファイラー • ラインビームパルス波形モニター

レーザ
• 波長：308nm • 出力：2J ～ 4J x 600Hz • エネルギー安定性：1s $\leq$ 0.45% (2J) • ガス寿命：1E8 ショット • パルス幅：24ns

5. おわりに

LTPS TFT は超高精細液晶ディスプレイや有機 EL ディスプレイの核となる技術としての需要が高まっている。また、競合技術として酸化物 TFT などの新素材が開発されているが、ELA 方式は最も高い電子移動度を実現する標準の技術として確立されている。当社は ELA 装置のリーディングカンパニーとして、将来の需要を見据えた第 8 世代に対応した装置開発を進めると共に、より品質・生産性の高い装置を提供すべく、装置開発とアフターサービスの充実を進めて行きたい。

導光板専用成形機「LGP180HP」

1. はじめに

昨年１年間に世界では13億台以上のスマートフォンが出荷されています。最近のスマートフォンやタブレット端末の傾向として大型化、薄型化、軽量化が求められ、液晶画面に使用される導光板も大型化および薄肉化の要求がより一層厳しくなってきています。さらに導光板品質として重要視される平面度や均一な肉厚、製品内色差、高転写性など高度な要求品質に応えるべく開発されたのが導光板専用成形機「LGP180HP」です。

2. 「LGP180HP」の概要

LGP180HPは４インチ・スマートフォンから１４インチ・タブレットＰＣをターゲットとした導光板専用成形機です。型締装置には直圧式型締装置を採用し、導光板の要求品質を満たすべく名機製作所の長い歴史の中で積み重ねたノウハウが注ぎ込まれています。また、射出装置には日本製鋼所製の高応答・高速・高圧電動射出装置を搭載し、より大型化・薄肉化する導光板に対しても成形性のマージンを大きく取ることが可能となっています。

3. 導光板に求められる品質

(1) 肉厚偏差・薄肉化

導光板に求められる品質の中に肉厚偏差があります。10インチ・t0.5mmの導光板では20μm以下、5インチ・t0.3mmの導光板では10μm以下の面内偏差が求められます。

この要求に対応するためLGP180HPでは、成形時の台盤の撓みに対して有利な直圧式型締装置を採用しています。直圧式型締装置では可動盤の中央を直接押すことで型締力を金型にダイレクトに反映することが出来ます。さらに高剛性台盤や大型リニアガイド、大径ラム、高剛性ベッドなどで構成することによって台盤および金型の変形を最小限に抑えています。それに加え台盤平行度調整機能を装備し、成形条件だしの時などに実際の成形品の肉厚測定結果を確認し、必要に応じて平行度を調整することによって成形品肉厚の微調整が可能となっています。これらの構造・機能の採用により肉厚偏差の少ない成形品を実現しています。(図1)

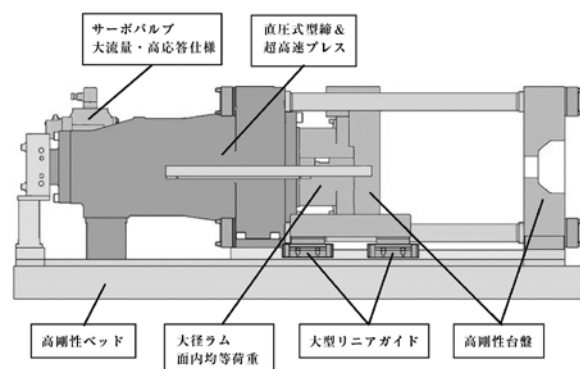



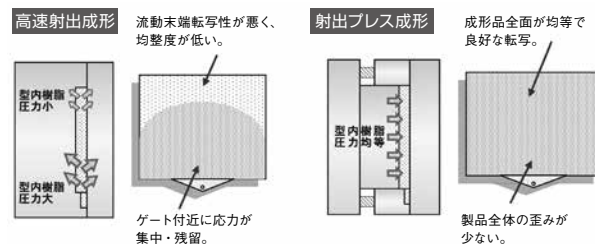
図1

(2) 光学特性

導光板に求められる光学特性は、製品全面において均一で高い輝度が得られることが求められます。肉厚の薄い導光板金型では、非常に狭いキャビティ内に樹脂を充填させるためゲートから離れたキャビティ末端では射出圧力がかかり難くなります。そのため光学パターンの転写性が悪くなり十分な輝度を得られない場合があります。

LGP180HPでは、射出プレス成形を行うことによって、この問題に対応しています。射出充填開始前にわずかに金型を開いておき広くなった通路に高速・低圧で樹脂を充填し高速プレスを行うことによって成形品全面に均等な圧力がかかり均一な転写性を得ることが出来ます。(図2)

図2

株式会社 名機製作所　〒474-8666　愛知県大府市北崎町大根2　Tel.0562-48-2111　Fax.0562-47-2316
Meiki Co.,Ltd

この時に重要となってくるのがプレス速度です。キャビティ内に充填された樹脂は、金型によって刻一刻と冷やされていき流動性を失っていきます。樹脂の流動性が失われないうちにいかに早くプレス完了するかが重要となってきます。LGP180HPではアキュームレータと大流量・高応答サーボバルブを搭載することによって型締力0→1750kNまで0.048secで完了することができ、より良好な転写性を得ることが出来ます。（図3）

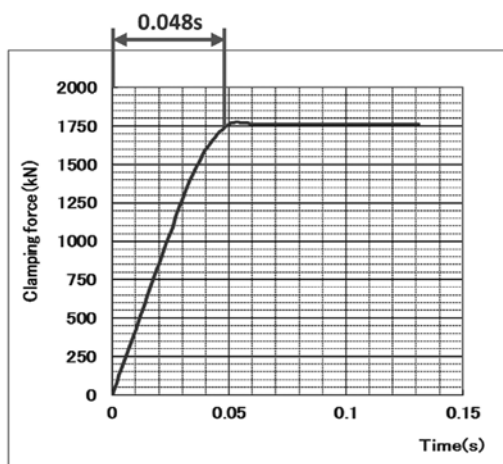



図3

(3) 黄変

導光板の主流材料であるポリカーボネートを成形する場合にしばしば問題となるのが黄変です。黄変の原因となるいくつかの要因に対しLGP180HPでは次のような対応をしています。

狭いゲートやキャビティを高速充填する時の剪断発熱による熱劣化に対しては、射出プレス成形を行うことにより低圧射出が可能になり剪断発熱を抑制する効果があります。また光学専用スクリュ／シリンダを搭載することによってシリンダ内の滞留や汚染を抑えています。

可塑化時に発生するガスに対しては、オプションでフィードスクリュ式材料供給装置を用意し、飢餓供給を行うことでガス分の排出を行うことが可能です。さらに真空可塑化装置VACMELTORを搭載すればガス分を強制的に排除することができ黄変対策として非常に有効です。

(4) 変形・反り

一般的な射出成形で薄肉導光板の末端まで十分に圧力をかけるためには高速かつ高圧で射出を行う必要があります。そのためゲート付近には高い応力が発生し、それが残留することによって変形や反りの原因となります。対して射出プレス成形の場合は、金型をわずかに開いた状態で充填するため低い射出圧力で充填が可能で、またプレス動作により製品全面に均一にプレス圧が働くので応力の残留がほとんどありません。

写真1は、偏光板を通して見た内部残留応力の分布です。上側の高速射出成形では、応力の残留を示す白色部分がゲートを中心に大きく広がっています。下側の射出プレス成形を行った製品では、応力の残留がほとんど無いことが分かります。

成形機：他社機
（140ton）
サイクル時間：22.0sec

成形機：MEIKI-LGP（70ton）
サイクル時間：9.0sec
材料：一般PC材

写真1

4. おわりに

導光板専用成形機LGP180HPはこれからも不断の研鑽を積み重ね、高精度化・薄肉化といったニーズに応えられるように今後も改良改善に努める所存です。

インジェクションブロー成形機 HP シリーズの紹介

1. はじめに

IPF（International Plastic Fair）2014 にて 2 台の成形機を出展した。1 つは当社が得意とするダイレクトブロー成形機の次世代モデルである HE シリーズ、もう 1 つは新たに開発を行ったインジェクションブロー成形機（以下、HP シリーズ）である。本稿では、HP シリーズ（写真 1）の概要について説明する。

写真 1　HPS-35D/05AJ（E2）の外観

2. 開発ターゲット

HP シリーズは、一般的なダイレクトブロー成形機では成形が困難な製品をターゲットとして開発を行った。以下に代表的な例を示す。

(1) 自動車部品用ブーツ

自動車のステアリングやジョイントに使用されるブーツは、製品口部の形状に関して外径・内径ともに非常に高い寸法精度が要求される。特に内径形状が複雑な場合、ダイレクトブロー成形では、客先が要求する形状・寸法精度を満足することは容易ではない。

また、胴体部にベローズ（ジャバラ）形状を持つ製品も多く、その肉厚をコントロールするためには成形条件の調整に長時間を要する。

(2) 医療用容器・化粧品容器

容器の外観が重視されるこれらの分野においては、特に製品口部において、パリソンの喰い切り部での微細な樹脂バリ発生がダイレクトブロー成形機では不可避であり、問題となる事が多い。

また、容器の用途に由来する特異な形状を要求される場合もある。

今回開発した HP シリーズでは、これらの課題を解消することが可能となる。HP シリーズにて成形された製品形状例を写真 2 に示す。

（口部拡大）

写真 2　HP シリーズ成形品形状例

3. 成形方法

HP シリーズは、口部形状をインジェクション成形、胴部形状をダイレクトブロー成形で行い、それらをまとめて成形を行う。また、一般的な射出（・延伸）ブロー成形法とは異なり、射出によるプリフォームの成形を必要としない。以下に HP シリーズの装置構成、及び成形方法について述べる。

株式会社 タハラ　〒134-0081　東京都江戸川区北葛西 1-17-22　Tel.03-3680-2131　Fax.03-3686-3439
Tahara Machinery Ltd.

（1）装置構成

①溶融樹脂を貯蔵するアキュムレータ（リングピストン駆動）
②口部のインジェクション成形を行う射出金型
③射出成形時に口部内径形状を形成するセンタピン
④胴部のブロー成形を行うブロー金型
⑤ブローアップした製品の不要部分を除去するカット機

（2）装置動作（図 1）

①押出機にて溶融・可塑化した樹脂を電動アキュムレータに充填する。
②射出金型を押出ダイに接触させて溶融樹脂を射出し、口部のインジェクション成形を行う。
③射出金型が押出ダイから離れる。それと同時に、口部と連なった筒状の溶融樹脂（パリソン）が押し出され、射出金型により引き上げられる。
④パリソンをブロー金型で挟み、エアを吹き込み胴部のブロー成形を行う。
⑤機内・機外のカット機にて製品下部の不要部分を除去し、製品を仕上げる。

以上の装置構成・成形方法にて成形を行うことで、ダイレクトブロー成形には無い、種々のメリットを得ることが出来る。次項にその特徴を紹介する。

4. 特　徴

（1）射出成形を用いることによって、製品先端部の形状が外径・内径ともに、ダイレクトブロー成形よりも高精度で成形することが出来る。

（2）ダイレクトブロー成形の場合に必ず生じる口部バリが存在しない。そのため、製品口部におけるパリソン喰い切り部の微細な樹脂バリが生じず、同時に、原料コストの削減にも繋がる。

（3）押出ダイ・コアの位置・アキュムレータの射出速度などをサーボ制御することで、複雑な厚みプロファイルを持つパリソンが得られ、製品肉厚を高精度にコントロールが可能であり、ベローズなどの胴部に複雑な形状を持つ製品も対応可能となる。

（4）ダイレクトブロー成形とは異なり、パリソンは上方向を向いた押出ダイ出口から上に押し出され、射出金型により引き上げられる。パリソンが自由落下するダイレクトブロー成形と比べ、ドローダウンの影響を受けにくいので、製品のバラツキを小さく抑えられる。

（5）アキュムレータなどの駆動系にサーボモータを用いているため、機械動作が常に安定しており、毎サイクル安定した製品を成形することが出来る。

（6）口部形状が複雑な製品を得る成形方法としては、射出（・延伸）ブロー成形や、射出成形機などで別途成形した口部パーツとアセンブリする方法が挙げられるが、それらの成形方法と比較し、低いイニシャルコストで成形が可能である。

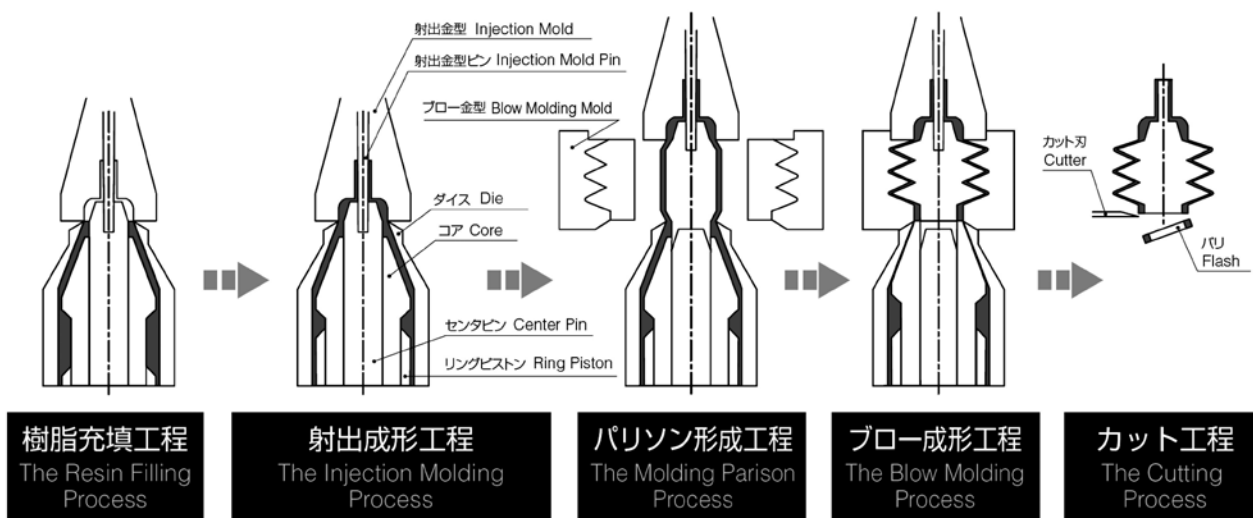



図 1　HP シリーズの成形方法

5. 主仕様

IPF 2014にて出展した、HPS-35D/05AJ（E2）の主仕様を表1に示す。

表1　装置主仕様

押出機		
スクリュー径	35	mm
スクリューL/D	26	
可塑化能力(LDPE)	10	kg/h
アキュムレータヘッド		
パリソン数	2	
ピッチ	170	mm
射出ストローク	60	mm
理論射出体積	42×2	cm³
最大保圧	26	MPa
型締装置		
型締力	35～50	kN
型締開閉距離	250	mm
金型 幅(W)	310	mm
高(H)	300	mm
厚(T)	80±0.2×2	mm
電気容量		
押出機	3.7	kW
ヒータ	8.7	kW
駆動	7.6	kW
制御	1.0	kW
合計	21.0	kW
実電力消費量	2.6	kWh
ドライサイクル	5	sec
(型締開閉・取出動作)		

6. おわりに

本成形機は自動車業界・医薬品業界などをターゲットに開発を行った。今後は、ダイレクトブロー成形では困難である、口部に精密な形状が求められる分野においてその活用が期待される。また、成形可能な口部形状のバリエーション、成形樹脂種類の多様化、多層成形などについて技術検討を行い、客先の様々なニーズに対応出来るよう開発を進めていく所存である。

日本製鋼所技報 66 号「産業機械特集号」発行にあたり

拝啓　貴下ますますご清祥のこととお慶び申し上げます。

日本製鋼所技報 66 号が発行の運びとなりましたので、ここにお届けさせていただきます。今号は「産業機械特集号」として、主に広島製作所および横浜製作所の製品を中心にして編集しております。また JSW グループの関連会社、JSW アフティ㈱、㈱名機製作所、㈱タハラの製品についても紹介しております。ご高覧の上、ご批判、ご指導賜れば幸いです。今後とも一層のお引き立てをよろしくお願い申し上げます。

万一　宛先の間違い、送付部数の過不足、本紙の落丁、乱丁などがございましたら失礼を深くお詫び申し上げますとともに、FAX にてご一報賜りたくお願い申し上げます。

敬　具

平成 27 年 10 月
株式会社　日本製鋼所
研究開発本部　技報編集事務局
吉田　稔

日本製鋼所技報 第66号

発行日　平成 27 年 10 月

編集・発行責任者　研究開発本部長　小野　信市

印刷所　株式会社 内外
東京都江東区石島 7 番 9 号
電話 03-3615-6481

発行所　株式会社 日本製鋼所
東京都品川区大崎 1 丁目 11 番 1 号
電話 03-5745-2001

FAX No.
03-5745-2049

ＦＡＸ 通信用紙

（宛　先）	（発信元）
（株）日本製鋼所 研究開発本部 技報編集事務局　行	所　属： お名前： ＴＥＬ： ＦＡＸ：

日本製鋼所技報第66号

（通信欄）

■本社・支店

本　　社　東京都品川区大崎1-11-1（ゲートシティ大崎 ウエストタワー）
〒141-0032　☎(03)5745-2001
FAX.(03)5745-2025

関西支店　大阪府大阪市西区靭本町1-11-7（信濃橋三井ビル）
〒550-0004　☎(06)6446-2480
FAX.(06)6446-2488

九州支店　福岡県春日市桜ヶ丘1-23-2
〒816-0872　☎(092)582-8111
FAX.(092)582-8124

名古屋支店　名古屋市中区栄2-9-15（三井住友海上名古屋しらかわビル）
〒460-0008　☎(052)222-1271
FAX.(052)222-1275

中国支店　広島県広島市安芸区船越南1-6-1
〒736-8602　☎(082)822-0991
FAX.(082)822-0997

札幌支店　北海道札幌市中央区北一条西5-2-9（北一条三井ビル）
〒060-0001　☎(011)241-2271
FAX.(011)241-2275

■製作所

室蘭製作所　北海道室蘭市茶津町4
〒051-8505　☎(0143)22-0143
FAX.(0143)24-3440

広島製作所　広島県広島市安芸区船越南1-6-1
〒736-8602　☎(082)822-3181
FAX.(082)285-2038

横浜製作所　神奈川県横浜市金沢区福浦2-2-1
〒236-0004　☎(045)781-1111
FAX.(045)787-7200

■研究所

室蘭研究所　北海道室蘭市茶津町4（室蘭製作所内）
〒051-8505　☎(0143)22-9226
FAX.(0143)22-4180

広島研究所　広島県広島市安芸区船越南1-6-1（広島製作所内）
〒736-8602　☎(082)822-3231
FAX.(082)822-4298

■海外拠点/海外現地法人

JAPAN STEEL WORKS EUROPE GMBH
Friedrichstr. 19, 40217 Dusseldorf, F.R.Germany
TEL.+49-211-3116660 FAX.+49-211-31166640

JAPAN STEEL WORKS AMERICA, INC.
NEW YORK OFFICE
122 East 42nd Street, Suite 3810,
New York, NY,10168, USA
TEL.+1-212-490-2630 FAX.+1-212-490-2575
DETROIT OFFICE
41135 Vincenti Court Novi, MI 48375 U.S.A.
TEL.+1-248-536-0288 FAX.+1-248-536-5615
HOUSTON OFFICE
9801 Westheimer Road, Suite 220, Houston, TX77042
TEL.+1-713-588-1303 FAX.+1-713-588-1322

JAPAN STEEL WORKS INDIA PRIVATE LTD.
611, Time Tower, MG Road, Sector 28,
Gurgaon, Haryana, 122001, India
TEL.+91-124-469-4444 FAX.+91-124-469-4433

JSW MACHINERY TRADING (SHANGHAI) CO.,LTD.
HEAD OFFICE
上海市天山路600弄4号
思創大厦28
28A, Strength Plaza, No.600-4, Tianshan Road,
Shanghai 200051, China
TEL.+86-21-6192-1022 FAX.+86-21-6192-1023
BEIJIN BRANCH
北京市朝陽区東三環北路3号
幸福大厦B座622室
Room 622, B Section, Xingfu Plaza, No.3,
DongSanHuan North Road, Chaoyang District, Beijing,
100027, China
TEL.+86-010-6590-8967 FAX.+86-010-6590-8968

JSW PLASTICS MACHINERY, INC.
HEAD OFFICE
555 South Promenade Ave., Unit 104 Corona,
California 92879, U.S.A.
TEL.+1-951-898-0934 FAX.+1-951-898-0944
CHICAGO OFFICE
540 Capital Drive, Suite 130, Lake Zurich, IL 60047,
U.S.A.
TEL.+1-847-550-0704 FAX.+1-847-550-0725
DETROIT OFFICE
24301 Catherine Industrial Drive, Unit 118 Novi,
MI 48375 U.S.A.
TEL.+1-248-449-5422/5424 FAX.+1-248-449-6018

THE JAPAN STEEL WORKS (SINGAPORE) PTE. LTD.
17 Gul Lane, Jurong Town, Singapore 629413,
Republic of Singapore
TEL.+65-6861-4511 FAX.+65-6862-3166
TLX.RS26561(JSWPTE)

PT. JSW PLASTICS MACHINERY INDONESIA
Gajah Building Unit K, Jl. Dr. Saharjo No.111 Tebet,
Jakarta Selatan 12810, Indonesia
TEL.+62-21-8370-2536 FAX.+62-21-829-8264

JSW PLASTICS MACHINERY (PHILIPPINES) INC.
Unit 802 Alabang Business Tower, 1216 Acacia Avenue,
Madrigal Business Park Alabang Muntinlupa city Metro
Manila 1771, Philippines
TEL.+63-2-478-2533 FAX.+63-2-809-6221

The Japan Steel Works (Thailand) Co., LTD.
78/6 JST Building 4th Fl., Moo 7 King Kaew Road,
Rachatewa, Bangplee, Samutprakarn 10540,
Kingdom of Thailand
TEL.+66-2-738-5272 FAX.+66-2-738-5277

JSW PLASTICS MACHINERY(M) SDN.BHD.
D6-5-G, (Ground Floor), Block D6, Pusat Perdagangan
Dana 1, Jalan PJU 1A/46, 47301, Petaling Jaya,
Selangor Darul Ehsan, Malaysia
TEL.+60-3-7842-6076/6077 FAX.+60-3-7842-6078

JSW PLASTICS MACHINERY VIETNAM LTD.
Thang Long Industrial Park, Dong Anh District, Hanoi,
Vietnam
TEL.+84-4-951-6383 FAX.+84-4-951-6384

JSW PLASTICS MACHINERY(H.K.) CO.,LTD.
香港新界沙田安麗街11號 企業中心9楼907室
Room 907, Corporation Park, 11 On Lai Street,
Sha Tin, N. T, Hong Kong
TEL.+852-2648-0720 FAX.+852-2686-8204

JSW PLASTICS MACHINERY(TAIWAN) CORP.
HEAD OFFICE
桃園縣33373 亀山郷大湖一路21 號一樓
1F., No.21, Da Hu 1st Road, Guieshan Shiang, Taoyuan,
Country 33373 Taiwan, R.O.C.
TEL.+886-3-396-2102 FAX.+886-3-396-2104
TAINAN BRANCH
台南縣71052 永康市小東路689-78號 15 樓之 7
15F., -7, No.689-78, Xiaodong Road, Yongkang City,
Tainai Country 71052 Taiwan, R.O.C.
TEL.+886-6-311-4192 FAX.+886-6-311-4193

JSW INJECTION MACHINE MAINTENANCE (SHENZHEN) CO., LTD.
1F, YiBen Electronic & Business Industrial Park, No.
1063 Chaguang Road, Xili Town, Nanshan District,
Shenzhen City, Guangdong Province, P.R.C.
TEL.+86-755-8602-0930 FAX.+86-755-8602-0934